



# **Modelação Bidimensional de Habitats Fluviais para Espécies Piscícolas Aplicação do Modelo CasimirFish2D**

**Verónica Raquel Barroso Dias**

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Florestal e dos Recursos Naturais**

Orientador: Doutora Maria Teresa Marques Ferreira da Cunha Cardoso

Co-orientador: Doutor José Maria Horta e Costa Silva Santos

**Júri:**

Presidente: Doutora Maria Helena Reis de Noronha Ribeiro de Almeida, Professora Associada do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa.

Vogais: Doutor António Alberto do Nascimento Pinheiro, Professor Catedrático do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa;

Doutora Maria Teresa Marques Ferreira da Cunha Cardoso, Professora Associada com Agregação do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa, orientadora;

Doutora Manuela Rodrigues Branco Simões, Professora Auxiliar com Agregação do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa;

Doutor José Maria Horta e Costa Silva Santos, Investigador Auxiliar do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa, co-orientador.

Lisboa, 2013



# Agradecimentos

Felizmente muitas foram as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, a todas deixo um especial e profundo agradecimento.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à Professora Teresa Ferreira, orientadora científica da dissertação, a partilha de ideias, a motivação contagiante e o apoio prestado.

Gostaria igualmente de agradecer ao Doutor José Maria Santos, co-orientador científico da dissertação, a orientação no início da tese que foi essencial, a documentação facultada, o apoio no desenvolvimento do trabalho, a resposta a todas as minhas dúvidas, os conselhos e críticas construtivas, a elaboração dos conjuntos e regras *fuzzy*, a sua ajuda incondicional e a sua amizade.

Agradeço à Isabel Boavida, que apesar de não ser orientadora desta dissertação, desempenhou também essas funções. A ela agradeço a partilha de conhecimentos, a ajuda, a sua disponibilidade incondicional, os seus conselhos, ideias e motivação, incansáveis, a cedência de dados relativos à Ribeira de Odelouca, assim como a modelação hidrodinâmica no River2D. Mais do que o acompanhamento no desenvolvimento deste trabalho agradeço a sua amizade.

Ao Professor Rui Cortes, da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro quero agradecer a disponibilidade na cedência de dados relativos ao caso de estudo da ribeira de Odelouca.

To Matthias Schneider I would like to thank all the support and contribute to this thesis, the knowledge transmitted about modeling habitat with CasimirFish2D, and software. To Ianina Kopecky I would like to thank the tools/commands provided to import hydraulic data from River2D.

Gostaria de agradecer também ao Professor Francisco Martinez Capel, da Universidade Politécnica de Valência, pela iniciativa de um curso sobre Casimir, pela cedência e partilha de documentação, e sua disponibilidade.

Deixo uma palavra especial à minha família, agradeço aos meus pais e irmão pelo incentivo e apoio na realização deste trabalho. Ao Luís, um obrigado especial pela ajuda na revisão final da tese, e por estar sempre presente nos momentos mais difíceis, com uma palavra de ânimo e carinho.



## Resumo

A degradação de habitats piscícolas associados à regulação de caudais, consequência da crescente demanda humana sobre os recursos hídricos, leva à diminuição da diversidade e riqueza de espécies piscícolas, tornando-se crucial o estudo dos impactes sobre estas a fim de as proteger e conservar.

No presente estudo aplicou-se uma metodologia baseada na relação entre o habitat piscícola e o caudal, a fim de avaliar o impacte da regulação de caudais sobre duas espécies. Foi considerada uma nova abordagem, a lógica *fuzzy*, que utiliza o conhecimento de especialistas para relacionar disponibilidade de habitat e parâmetros hidráulicos.

Analisou-se a ribeira de Odelouca, a sudoeste de Portugal, aplicando o modelo de habitat CasimirFish2D a um troço a jusante da barragem de Odelouca, e simulando a disponibilidade de habitat para duas espécies ciprinícolas endémicas, o escalo do Arade (*Squalius aradensis*) e a boga do sudoeste (*Iberochondrostoma almcai*), considerando os diferentes estágios de vida.

Os resultados obtidos validaram que a regulação de caudais levou à diminuição da adequabilidade de habitat, para ambas as espécies, e que esta varia com a ontogenia. O modelo CasimirFish2D apresenta-se como uma boa alternativa a outros modelos de habitat e poderá ter uma boa aplicabilidade em estudos de restauro fluviais.

**Palavras-chave:** *fuzzy*, modelação, bidimensional, habitat, Casimir.



# Abstract

Habitat degradation associated with river regulation, consequence increasing human demands on water resources, and result is changed richness and diversity fish species. Projects ecological habitat to improve becomes a priority for authorities in many countries.

In the present study, a methodology based on the relationship between fish habitat and stream flows, is applied in order to determine impact the regulate flows to species. A new approach based on fuzzy sets and rules, linguistic rules describe the imprecise information which often characterizing ecological data and enable implementing the interactions between physical variables. The habitat selection of several species can be predicted adequately based on expert knowledge.

Analyzed the Odelouca River, in the south-west of Portugal, when applied the CasimirFish2D model habitat to a stream downstream Odelouca Dam and the fish habitat was determined for two endemic cyprinids species, Iberian chub (*Squalius aradensis*) and Iberian nase (*Iberochondrostoma almaca*).

The results validated that decrease in availability habitat exists, and changes according to ontogeny. Casimir is a good alternative to others habitat models and may be having a good applicability in fluvial restoration studies.

**Key-words:** fuzzy, modelling, 2D-dimensional, habitat, Casimir.





## Extended Abstract

Habitat degradation associated with river regulation, consequence increasing human demands on water resources, and result is changed richness and diversity species. Fish communities in Mediterranean rivers are dominated by cyprinids and are characterized by high number of endemic species, which have a reduced distribution range. Rivers are the type of ecosystem most affected by human action and the fish species that support the most endangered in the world. There exists a strong need for increased efforts to invert the declining trends. Projects ecological habitat to improve becomes a priority for authorities in many countries.

In the present study, a methodology based on the relationship between fish habitat and stream flows, is applied in order to determine impact the regulate flows to species. A new approach based on fuzzy sets and rules, linguistic rules describe the imprecise information which often characterizing ecological data and enable implementing the interactions between physical variables. The habitat selection of several species can be predicted adequately based on expert knowledge.

Habitat and hydrodynamic models have been used as tool of decision support in water resources management. These allow determine the relationship between flow and habitat, in order to protect the ecological values of freshwater ecosystems. Several models have been used in this context, CasimirFish2D, a relatively recent model, use of an approach based on expert knowledge, fuzzy logic, replacing the use of preference curves in habitats modeling.

Analyzed the Odelouca River, in the south-west of Portugal, when applied the CasimirFish2D model habitat to a stream downstream Odelouca Dam and the fish habitat was determined for two endemic cyprinids species, Iberian chub (*Squalius aradensis*) and Iberian nase (*Iberochondrostoma almaca*).

The results validated that decrease in availability habitat exists, and changes according to ontogeny. The adults are most susceptible to flowrates variations. Iberian nase is dependent of organic substrate present in river edges. Iberian chub shows better adapted to stream section in study, its habitat availability is uniform.

Casimir is a good alternative to others habitat models and may be having a good applicability in fluvial restoration studies.

**Key-words:** fuzzy, modelling, 2D-dimensional, habitat, Casimir.



## Índice do texto

1	Introdução.....	1
2	Análise bibliográfica.....	3
2.1	Metodologia incremental .....	3
2.1.1	Princípios gerais .....	3
2.1.2	Unidades de habitat da IFIM .....	4
2.1.3	Caudal ecológico .....	7
2.2	Modelação hidrodinâmica e do habitat.....	9
2.2.1	Princípios gerais .....	9
2.2.2	O Modelo RIVER2D .....	11
2.2.3	O Modelo CASIMIRFish2D .....	12
3	Metodologia aplicada.....	15
3.1	Lógica <i>Fuzzy</i> ou Teoria de Conjuntos <i>Fuzzy</i> .....	15
3.3	Modelação de Habitat. CasimirFish2D.....	18
4	Caso de estudo. Ribeira de Odelouca .....	21
4.1	Considerações prévias .....	21
4.2	Enquadramento da área em estudo.....	22
4.2.1	Caracterização do troço em estudo .....	22
4.2.2	Caracterização das espécies .....	23
4.3	Trabalhos de campo.....	24
4.3.1	Recolha de dados.....	24
4.4	Modelação hidrodinâmica – River 2D .....	27
4.5	Modelação do habitat para peixes – CasimirFish2D.....	28
4.5.1	Conjuntos <i>Fuzzy</i> .....	30
4.5.2	Regras <i>Fuzzy</i> .....	31
5	Resultados.....	33
6	Discussão .....	43
7	Bibliografia.....	45
	Anexos.....	51



## Índice de quadros

Quadro 4.1. Classes de substrato (Bain e Stevenson 1999). .....	25
Quadro 4.2. Mesohabitats das quatro secções transversais do troço em estudo da ribeira de Odelouca. ....	26
Quadro 4.3. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Caudais médios mensais ( $\text{m}^3/\text{s}$ ). Adaptado de Boavida (2007). ....	29
Quadro 4.4. Ribeira de Odelouca. Caudais médios mensais ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) provenientes da bacia própria. Adaptado de Boavida (2007). ....	29
Quadro 4.5. Ribeira de Odelouca. Caudais médios mensais a montante da barragem ( $\text{m}^3/\text{s}$ ). Caudais naturais. ....	29
Quadro 4.6. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Caudais médios mensais regulados ( $\text{m}^3/\text{s}$ ). Caudais regulados. ....	30

## Anexos

Quadro A4.1. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Ficheiro .txt com os conjuntos <i>fuzzy</i> para o escalo e boga. Importação para CasimirFish com a extensão .SRFzs. ....	53
Quadro A4.2. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Ficheiro .txt com as regras <i>fuzzy</i> para a boga adulto. Importar para CasimirFish com a extensão .SRFzy. ....	54



## Índice de Figuras

Figura 2.1. Habitat total combinando os elementos de macrohabitat e microhabitat. Adaptado de Stalnaker <i>et al.</i> (1995). .....	5
Figura 3.1. Lógica <i>Fuzzy</i> . Esquema geral de um modelo <i>fuzzy</i> . Adaptado de Adriaenssens <i>et al.</i> (2004). .....	16
Figura 3.2. Lógica <i>fuzzy</i> . Procedimento generalizado que ocorre em CasimirFish2D. Adaptado de Schneider 2012. ....	17
Figura 3.3. CasimirFish. Conjuntos <i>fuzzy</i> padrão. Adaptado de Schneider <i>et al.</i> 2010. ....	18
Figura 4.1. Mapa da localização área de estudo, mostrando a localização da ribeira de Odelouca e do troço em estudo. ....	21
Figura 4.2. Ribeira de Odelouca. Vista geral do troço em estudo. Vista para montante (a). Vista para jusante (b). ....	23
Figura 4.3. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Material do leito: blocos de calcário nas margens. ....	23
Figura 4.4. Ribeira de Odelouca. Boga do sudoeste ( <i>Iberochondrostoma almacaí</i> ) (a) e Escalo do Arade ( <i>Squalius aradensis</i> ) (b). ....	24
Figura 4.5. Conjuntos <i>Fuzzy</i> das variáveis <i>input</i> , velocidade, profundidade e substrato, e da variável <i>output</i> , índice de adequação de habitat (HSI) para a Boga e o Escalo. ....	30
Figura 4.6. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Distribuição da velocidade (m/s) ( $Q = 2,05 \text{ m}^3/\text{s}$ ). ....	33
Figura 4.7. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Distribuição da profundidade (m) ( $Q = 2,05 \text{ m}^3/\text{s}$ ). ....	33
Figura 4.8. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Distribuição de substrato. ....	34
Figura 4.10. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Adequabilidade de habitat físico para o escalo juvenil (HSI). ....	35
Figura 4.9. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Adequabilidade de habitat físico para o escalo adulto (HSI). ....	35
Figura 4.11. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Adequabilidade de habitat físico para o escalo alevim (HSI). ....	36
Figura 4.12. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Adequabilidade de habitat físico para a boga adulto (HSI). ....	36
Figura 4.13. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Adequabilidade de habitat físico para a boga juvenil (HSI). ....	37
Figura 4.14. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Adequabilidade de habitat físico para a boga alevim (HSI). ....	37

Figura 4.15. Áreas com o mesmo valor de HSI, em função do caudal, através de percentagem (%) para o escalo, adulto (a), juvenil (b) e alevim (c). .....	38
Figura 4.16. Áreas com o mesmo valor de HSI, em função do caudal, através de percentagem (%) para a boga, adulto (a), juvenil (b) e alevim (c).....	38
Figura 4.17. Ribeira de Odelouca. Curvas WUA ( $m^2$ ) obtidas para o escalo, em função do caudal, para as fases do seu ciclo de vida, adulto (a), juvenil (b) e alevins (c).....	39
Figura 4.18. Ribeira de Odelouca. Curvas WUA ( $m^2$ ) obtidas para a boga, em função do caudal, para as fases do seu ciclo de vida, adulto (a), juvenil (b) e alevim (c).....	39
Figura 4.19. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Curvas WUA ( $m^2$ ) obtidas em função dos meses do ano, para o caudal natural e para o caudal regulado. Escalo adulto. ....	40
Figura 4.20. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Curvas WUA ( $m^2$ ) obtidas em função dos meses do ano, para o caudal natural e para o caudal regulado. Escalo juvenil. ....	40
Figura 4.21. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Curvas WUA ( $m^2$ ) obtidas em função dos meses do ano, para o caudal natural e para o caudal regulado. Escalo alevim. ....	41
Figura 4.22. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Curvas WUA ( $m^2$ ) obtidas em função dos meses do ano, para o caudal natural e para o caudal regulado. Boga adulto. ....	41
Figura 4.23. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Curvas WUA ( $m^2$ ) obtidas em função dos meses do ano, para o caudal natural e para o caudal regulado. Boga juvenil. ....	41
Figura 4.24. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Curvas WUA ( $m^2$ ) obtidas em função dos meses do ano, para o caudal natural e para o caudal regulado. Boga alevim. ....	42



## **Siglas de Entidades**

IA – Instituto do Ambiente

INAG – Instituto da Água

ISA – Instituto Superior de Agronomia

SHIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

USFWS – United States Fish and Wildlife Service

UTAD – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

## **Abreviaturas**

CASIMIR – Computer Aided Simulation Model for Instream Flow Requirements

EH – Estação hidrométrica

EVHA – Evaluation de l’habitat physique des poissons en rivière

GIS – Geographic Information Systems

GPS – Global Positioning System

HEP – Habitat Evaluation Procedures

HHS – Hydraulic Habitat Suitability Index

IFIM – Instream Flow Incremental Methodology

MesoHABSIM – Mesohabitat Simulation Model

PHABSIM – Physical Habitat Symulation System

RHABSIM - Riverine Habitat Simulation

SI – Sistema Internacional de Unidades

SPU – Superfície Ponderada Útil

WUA – Weight Usable Area



# 1 Introdução

A crescente demanda humana sobre os recursos hídricos, com a criação de barragens para irrigação, abastecimento urbano e produção de energia eléctrica, levam à necessidade de criar uma regulação de caudais, que pode ter consequências negativas para o ambiente (Costa *et al.* 2012), especialmente durante os períodos mais secos do ano, quando os caudais naturais não acompanham as necessidades de água para fins domésticos e agrícolas.

Os rios são o tipo de ecossistema mais afectado pela acção humana, e as espécies de peixes que o suportam, as mais ameaçadas em todo o mundo (Boavida *et al.* 2011). Existe assim uma forte necessidade de um esforço redobrado para inverter as tendências declinantes. Projectos de melhoria ecológica do habitat tornam-se uma prioridade para as autoridades de muitos países.

A jusante de um aproveitamento hidráulico verifica-se a redução do caudal médio, a diminuição da variação sazonal do caudal, a alteração da época de ocorrência de caudais extremos, com a redução da magnitude das cheias e/ou a ocorrência de descargas não naturais (Alves e Bernardo 2002). A modificação do regime hidrológico conduz à alteração da velocidade e da profundidade do escoamento, do regime de transporte sólido e da morfologia do leito, da temperatura e da qualidade da água. O habitat das espécies dulciaquícolas é consequentemente afectado, perdendo complexidade e induzindo impactes nas comunidades bióticas (Alves e Bernardo 2002). A maioria das espécies nativas ibéricas enfrenta ameaças ao nível da sua conservação, tendo vindo a sofrer um progressivo e generalizado declínio (Cabral *et al.* 2006).

Modelos hidrodinâmicos e de habitat têm sido utilizados como ferramenta de apoio à decisão, na gestão de recursos hídricos. Estes permitem determinar a relação existente entre o habitat de determinada espécie piscícola e o caudal, a fim de salvaguardar os valores ecológicos dos ecossistemas dulciaquícolas. Vários modelos têm sido usados neste âmbito, sendo o CasimirFish2D, um modelo relativamente recente que permite a utilização de uma abordagem baseada no conhecimento de especialistas, lógica *fuzzy*, substituindo a utilização de curvas de preferência na modelação de habitats, isto é, evitando o dispendioso e moroso trabalho de campo na elaboração destas e a sua especificidade a determinada região.

O objectivo deste trabalho de investigação é a aplicação do modelo CasimirFish2D para a modelação bidimensional do habitat piscícola de duas espécies piscícolas criticamente ameaçadas, considerando os diferentes estágios do seu ciclo de vida, baseada em lógica *fuzzy*, de modo a determinar o impacte da regulação de caudais, provocada pela construção da barragem de Odelouca. Aplicou-se o modelo CasimirFish2D a um troço a jusante da barragem, na ribeira de Odelouca, modelou-se o habitat piscícola para o regime hidrológico natural, e para o regime de caudais regulados, a fim de se avaliar o impacte da construção da barragem.

Após uma breve introdução ao tema e definição dos objectivos de estudo, apresenta-se no capítulo 2, uma revisão geral dos conhecimentos relativos às metodologias utilizadas para a combinação de dados de biologia e de habitat, dando especial importância à metodologia incremental. Serão abordados os modelos hidrodinâmicos e de habitat bidimensionais, referindo-se as principais potencialidades e aplicações do River2D, utilizado no presente estudo para a modelação hidrodinâmica, e do CasimirFish2D, usado para a modelação de habitat, visto que este último necessita da realização de cálculos hidráulicos num modelo hidráulico. A metodologia aplicada, baseada em conjuntos e regras *fuzzy*, é descrita no capítulo 3, assim como a sua aplicação no modelo CasimirFish2D. O capítulo 4 refere-se ao caso de estudo, ribeira de Odelouca, sendo descritos os passos para a modelação de habitat. Apresentam-se ainda os resultados obtidos, no capítulo 5, e por fim, no capítulo 6, elabora-se a discussão.

## 2 Análise bibliográfica

As metodologias de combinação de dados de biologia e de habitat serão apresentadas através de uma revisão geral de conhecimentos, dando especial importância à metodologia incremental.

Os modelos hidrodinâmicos e de habitat serão abordados, assim como as suas aplicabilidades, potencialidades e representações unidimensional e bidimensional. Apresentar-se-ão as principais vantagens dos modelos bidimensionais na simulação do habitat piscícola, as principais potencialidades e aplicações do River2D, utilizado no presente estudo para a modelação hidrodinâmica, e do CasimirFish2D, usado para a modelação de habitat, visto que este último necessita da realização de cálculos hidráulicos num modelo hidráulico.

### 2.1 Metodologia incremental

#### 2.1.1 Princípios gerais

A metodologia incremental, na terminologia anglo-saxónica Instream Flow Incremental Methodology (IFIM), é um dos instrumentos mais utilizados em todo o mundo para combinar dados de biologia e de habitat, principalmente de espécies piscícolas, com modelos que estimem a influência das diferentes formas de gestão dos recursos hídricos, no habitat (Boove 1982).

A IFIM é um sistema de apoio à decisão, que envolve uma equipa multidisciplinar, com vista a avaliar os benefícios e as consequências das diferentes alternativas na gestão de recursos hídricos. É composta por um conjunto de procedimentos analíticos que descrevem as características temporais e espaciais do habitat, resultantes de uma determinada alternativa (Boove 1982).

O carácter incremental desta metodologia prende-se com o modo como cada problema é encarado, permitindo que cada solução seja encontrada a partir de variações do caudal, com base numa solução inicial, considerando várias alternativas (Alves e Bernardo 2002).

Um dos pressupostos desta metodologia é que a dinâmica da população piscícola está, directa ou indirectamente, relacionada com a disponibilidade de habitat (Bovee *et al.* 1998). A variável de decisão gerada pela IFIM é a área de habitat disponível para as espécies piscícolas, sendo estimadas, para cada fase do ciclo de vida ou para uma actividade particular, as alterações na área de habitat devido a mudanças no regime hidrológico do curso de água (Gan e McMahon 1990).

Para estimar a variação do habitat disponível em função do caudal, a metodologia recorre a critérios de preferência de habitat de uma espécie, numa determinada fase do seu ciclo de vida (alevins,

juvenis ou adultos) e para uma actividade em particular (desova, alimentação, repouso) (Stalnaker *et al.* 1995).

As espécies alvo são seleccionadas de acordo com a sua representatividade no local de estudo (Mascarenhas e Coelho 2011), considerando que a maior parte das espécies piscícolas habitam em diferentes habitats consoante as diferentes fases do seu ciclo de vida, isto é, desovam num habitat e têm a fase adulta noutro, pelo que se torna relevante estudar separadamente as várias fases do ciclo de vida de uma espécie.

O modelo mais usado na IFIM é o Physical Habitat Symulation System (PHABSIM), que tem como principal objectivo desenvolver relações funcionais entre diferentes caudais e microhabitats para uma variedade de recursos aquáticos (Bovee 1997), trata-se de uma colecção de programas de computador, através dos quais se obtém a área total de habitat como uma função do caudal.

Os dados obtidos pelos modelos hidráulicos e de simulação de habitat são cruzados entre si, com o objectivo de se determinar a superfície ponderada útil (SPU) em função do caudal.

Considerando a curva SPU para cada fase do ciclo de vida das espécies seleccionadas, o ponto máximo corresponde ao valor do caudal abaixo do qual ocorre perda de habitat para a espécie.

Conhecem-se diferentes técnicas para implementar a metodologia incremental existindo, actualmente, um conjunto alargado de softwares desenvolvidos, para efectuar os cálculos necessários a essa implementação. O PHABSIM é um dos mais usados em todo o mundo, havendo, no entanto, outros: RHABSIM (EUA), Rhyahabsim (Nova Zelândia), EVHA (França) (Evaluation de l'habitat physique des poisons en rivière), RSS (Noruega) (River System Simulator), CASIMIR (Alemanha) (Computer Aided Simulation Model for Instream Flow Requirements), HEP (Holanda) (Habitat Evaluation Procedures), CAUDAL, SIMUL (Espanha) (Anchura Potencial Útil), River2D (Canadá) (Jalón 2002).

### **2.1.2 Unidades de habitat da IFIM**

Os dados de preferência na IFIM surgem sob a forma de duas unidades, macrohabitat e microhabitat. A preferência do macrohabitat refere-se às variáveis que variam longitudinalmente ao longo do rio, como a qualidade da água, a morfologia do canal, o caudal e a temperatura. Ao microhabitat dizem respeito as variáveis que se modificam localmente, como a profundidade, velocidade, substrato e cobertura (Boavida 2007).

O habitat total disponível para os organismos engloba o macrohabitat e o microhabitat (Stalnaker *et al.* 1995), conforme representado na figura 2.1, adaptada de Stalnaker *et al.* (1995). A figura

apresenta a relação entre estas duas unidades de habitat na determinação da disponibilidade deste para as espécies piscícolas.

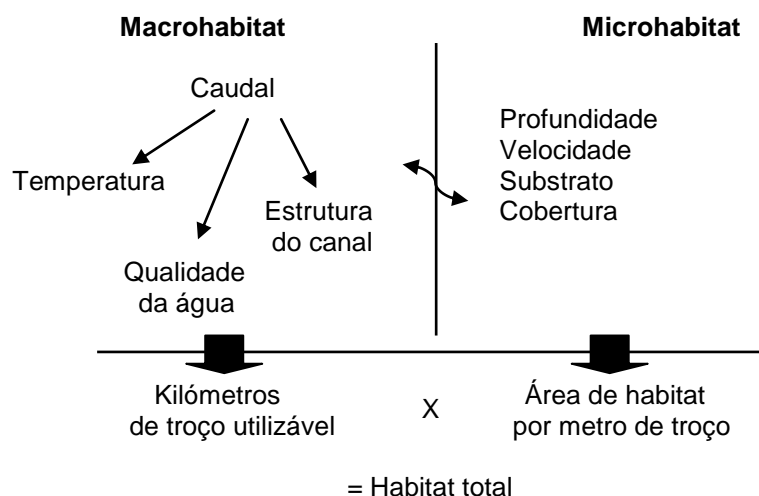


Figura 2.1. Habitat total combinando os elementos de macrohabitat e microhabitat. Adaptado de Stalnaker *et al.* (1995).

## Macrohabitat

O macrohabitat corresponde à área de estudo na IFIM, pode ser dividido em três níveis: bacia hidrográfica, sub-bacias e segmento do curso de água (Bovee *et al.* 1998).

O segmento do curso de água, considerado a unidade de habitat fundamental utilizada na IFIM (Bovee 1997), é uma porção de rio relativamente longa caracterizada por um regime de caudais homogéneo. O caudal à entrada do segmento é muito semelhante ao caudal à saída ( $\pm 10\%$ ), não tendo linhas de água afluentes significativas. A geomorfologia do leito (declive, sinuosidade, estrutura, geologia e uso do solo) é geralmente consistente dentro dos limites do segmento. As alterações estruturais dos segmentos processam-se à escala geológica.

A estrutura do canal é analisada ao nível do macrohabitat quando se pretendem estudar os efeitos na qualidade da água ou temperatura, ou quando o objectivo é manter a morfologia existente.

O macrohabitat pode ser subdividido em troços representativos, mesohabitats e microhabitats.

Um troço representativo é normalmente cerca de 10 a 15 vezes maior que a largura do canal, e contém muitos ou a totalidade dos tipos de mesohabitats presentes em todo o segmento (Bovee 1997).

A diversidade de mesohabitats de cada troço está directamente relacionada com a variedade biológica existente.

O mesohabitat tem geralmente um comprimento, aproximadamente, da mesma ordem de grandeza da largura do canal e caracteriza-se por uma área do rio com declive, forma e estrutura de canal, iguais (Bovee 1997). Este pode ser dividido em microhabitats.

Estas estruturas morfogénicas fluviais resultam da morfologia do canal e do tipo de escoamento que, por sua vez, resultam do regime hidrológico do sistema fluvial em questão, do tipo e da proporção relativa de substratos geológicos do leito, e dos padrões de erosão e sedimentação de materiais do leito.

Parasiewicz (2001), no desenvolvimento do Mesohabitat Simulation Model (MesoHABSIM), classificou os diversos tipos de mesohabitat que se podem encontrar num curso de água:

*Riffle* – zonas de profundidade baixa com velocidade de corrente moderada, alguma turbulência à superfície e um gradiente elevado, sendo a forma do leito do rio convexa;

Rápido – zonas com um gradiente mais elevado e com maior velocidade de corrente, apresentando substrato mais grosseiro e maior turbulência à superfície, a forma do leito do rio é convexa;

Cascata – rápidos muito inclinados com pequenas piscinas atrás de blocos de pedra e pequenas quedas de água;

*Pool* – zonas de água profunda represada por um bloqueamento do canal ou por uma parcial obstrução ao canal, com baixa velocidade de escoamento e forma do leito do rio côncava;

*Run* – cursos de água monótonos com talvegue bem definido, o leito do rio é longitudinalmente plano e lateralmente côncavo;

Água parada – poças de água ao longo das margens do canal, causadas por remoinhos atrás de obstruções;

Braço lateral – canais à volta de ilhas, mais pequenos que metade da largura do canal, frequentemente com uma elevação diferente da existente no canal principal.

Os tipos de mesohabitat referidos alteram-se muitas vezes com o tempo e com o caudal. Podem existir unidades de habitat que, com o aumento de caudal, alteram o seu tipo (e.g. passagem de *riffle* a *pool*).

## **Microhabitat**

O microhabitat é geralmente menor que a largura do canal e representa uma área relativamente homogénea em relação à profundidade, velocidade, substrato e cobertura. Definido pelas variáveis



hidráulicas e estruturais do rio, sendo ocupado por uma espécie-alvo durante um estágio de vida, em determinada época do seu ciclo de vida. Podem ainda ser adicionadas ou substituídas outras variáveis físicas, desde que sejam semelhantes às variáveis hidráulicas e estruturais (Bovee *et al.* 1998).

A estrutura do canal é analisada ao nível do microhabitat para avaliar as alterações na disponibilidade de habitat resultante das modificações na morfologia do canal.

### **Seleção de espécies**

A seleção das espécies-alvo deve ser representativa da variabilidade do mesohabitat e do microhabitat (Bovee *et al.* 1998).

Nos cursos de água onde é possível a seleção de várias espécies os investigadores recomendam que se agrupem as espécies em guildas, isto é, grupos de espécies que usam habitats similares e que exploram a mesma classe de recursos de uma forma semelhante. Partindo-se do princípio que estas espécies são afectadas de igual forma pela alteração dos recursos que exploram e que, uma vez avaliado o impacte sobre uma espécie, é possível estimá-lo sobre as restantes espécies da mesma guilda.

### **2.1.3 Caudal ecológico**

O caudal ecológico é por definição o caudal mínimo a manter no curso de água, que assegure a conservação e manutenção dos ecossistemas aquáticos e ripícolas, e a produção das espécies com interesse desportivo e comercial, a jusante de um aproveitamento hidráulico em que se verifique a modificação do regime natural (Alves e Bernardo 2002).

Os caudais ambientais incluem, para além dos caudais ecológicos, caudais de limpeza (*flushing flows*) para remoção de materiais finos depositados e manutenção da vegetação pioneira, caudais de manutenção da estrutura do leito e da capacidade de transporte, caudais de manutenção do nível freático, da zona ripária, e do leito de cheia, e caudais de manutenção de ecossistemas associados aos cursos de água, como zonas húmidas e estuários (Alves e Bernardo 2002).

As espécies que habitam o rio têm diferentes exigências de habitat e de caudais ao longo do ano, devido à sua adaptação a estas variações. Por esta razão, qualquer medida de restauro ou de restabelecimento da qualidade óptima do meio fluvial não determinará um valor único de caudal, mas antes um regime de caudais, com o fim de estabelecer um habitat adequado às exigências dos caudais escoados, nos diferentes estados de desenvolvimento das espécies aquáticas (Jalón 2002).

O regime de caudais ecológicos é constituído por valores de caudal que variam ao longo do ano (em geral de mês para mês) para atender às necessidades das espécies (ou comunidades), sendo flexível em função das condições hidrológicas naturais que se verificam em cada ano, em particular em anos secos.

A necessidade de garantir regimes de caudais, face a objectivos de recuperação ou manutenção de estados de boa ou elevada qualidade ecológica, é implicitamente reconhecida na Directiva 2000/60/CE (Directiva Quadro da Água) do Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia, de 23 de Outubro de 2000, que estabelece um quadro de acção comunitária no domínio da política da água.

### **Metodologias para a determinação do caudal ecológico**

Existem actualmente muitas metodologias diferentes para determinar o caudal ecológico, Tharme (2003) agrupou os diferentes métodos em quatro tipos: hidrológicos, hidráulicos, de simulação de habitat e holísticos.

Os métodos hidrológicos têm como base principal o registo histórico de caudais, a nível mensal ou diário, destinando-se somente às espécies e locais para os quais foram desenvolvidos. São métodos bastante limitados (Stalnaker *et al.* 1995), com um baixo nível de precisão, dado que não exigem o conhecimento do ecossistema para o qual o caudal mínimo é recomendado. Um dos métodos mais usado é o método de Tennant ou de Montana, desenvolvido no início da década de 70, em que o caudal ecológico recomendado é calculado com base em percentagens do caudal médio anual. Este método é particularmente adequado para estudos ao nível do planeamento regional (Alves e Bernardo 2002).

Os métodos hidráulicos são baseados na determinação da relação entre determinadas características hidráulicas, como o perímetro molhado, o caudal, a velocidade e a profundidade máxima. O método hidráulico mais utilizado considera a variação do perímetro molhado associado ao caudal, admitindo que existe uma relação directa entre este e a disponibilidade de habitat para as espécies piscícolas. Esta relação obtém-se com base na definição de secções transversais, onde se realizam medições de uma ou mais variáveis hidráulicas, que sejam directamente afectadas pela variação do caudal e que constituam um factor limitativo para as espécies em estudo (Boavida 2007). Identifica-se um ponto de inflexão, na curva resposta, a partir do qual o aumento de caudal se traduz num aumento pouco significativo do perímetro molhado (Alves e Bernardo 2002) e numa deterioração da qualidade de habitat tornando-se significativamente degradado, e define-se como o caudal recomendado o que correspondente ao ponto de inflexão. No entanto, esta metodologia não tem em conta as preferências de habitat das espécies ao longo do seu ciclo de vida.

Os métodos de simulação de habitat, baseados na relação entre o habitat e o caudal são os mais avançados para a determinação do caudal ecológico. Recorrem a critérios de aptidão de habitat para uma espécie, numa determinada fase do seu ciclo de vida, para estimar a variação da disponibilidade deste em função do caudal (Boove *et al.* 1998). Estes métodos são uma extensão natural dos métodos hidráulicos, tendo a diferença de que a recomendação de caudais mínimos se fundamenta nas condições hidráulicas que estão de acordo com as exigências biológicas, em vez dos parâmetros hidráulicos. São mais flexíveis, é possível avaliar a variação de habitat utilizado por várias espécies e estágios de vida, ao longo do ano, e seleccionar os caudais que favorecem esse habitat. No entanto é necessário dispor de um bom conhecimento do ecossistema e de objectivos claros de gestão, a fim de resolver potenciais exigências de requisitos de habitat de diferentes espécies (Jowett 1997).

O método holístico, desenvolvido por Arthington *et al.* (1992), tem como principal objectivo propor metodologias de cálculo de caudais ambientais que satisfaçam e conservem o ecossistema do rio e não apenas algumas espécies piscícolas alvo. Este método assume que a integridade ecológica do ecossistema fluvial é determinada, entre outros factores, pelo regime hidrológico natural. Todas as necessidades do ecossistema devem ser consideradas, incluindo a manutenção do leito, zona ripária, leito de cheia, águas subterrâneas, zonas húmidas e estuários, e espécies com elevado estatuto de conservação.

## **2.2 Modelação hidrodinâmica e do habitat**

### **2.2.1 Princípios gerais**

Os modelos hidrodinâmicos têm sido desenvolvidos para prever as mudanças de velocidade de escoamento e profundidade, para variações específicas de caudais. A propensão dos peixes para favorecer, a intervalos específicos, variáveis físicas, e a capacidade de modelos hidrodinâmicos para prever a velocidade e a profundidade, foram combinados para prever o impacto potencial de alterações de caudais no habitat dos peixes (Boavida 2012).

Os modelos permitem avaliar a adequação do habitat para os organismos aquáticos, com base em variáveis físicas tais como a profundidade, a velocidade e o substrato (Bovee 1982).

Tradicionalmente a modelação hidrodinâmica tem sido focada na representação unidimensional do canal aberto de caudal, em que a profundidade e velocidade média são obtidas por um corte transversal. Os modelos 1D mais comuns são o HEC-RAS e MIKE11, sendo o mais popular, o modelo hidrodinâmico acoplado com um modelo de adequação de habitat, o PHABSIM (Physical Habitat Simulation) utilizado por US Fish and Wildlife Service (Bovee 1982).

O desenvolvimento deste modelo ocorreu na sequência do estabelecimento da IFIM para avaliar o impacto da regulação do rio sobre a disponibilidade de habitat de peixes, a fim de calcular a evolução de caudais.

O PHABSIM, um modelo unidimensional, permite relacionar as alterações de caudal e a geomorfologia do leito com a área de microhabitat (definido pelos parâmetros profundidade, velocidade de escoamento, substrato e cobertura), disponível para uma determinada espécie piscícola (ou de macroinvertebrados), considerando as várias fases do ciclo de vida (alevins, juvenis e adultos) ou actividades específicas (reprodução, desova, alimentação e repouso). O resultado da modelação hidráulica é a SPU para uma gama de caudais.

O PHABSIM opera segundo o seguinte pressuposto, se um habitat físico é o factor limitante, a qualidade e quantidade de habitat disponível, traduzido no valor de SPU, para um estágio de vida durante um determinado caudal, está directamente relacionado com os níveis da população piscícola.

Ghanem *et al.* (1996) compararam as abordagens unidimensionais (1D) e bidimensionais (2D), e relataram várias vantagens na utilização de modelos 2D, considerados uma ferramenta poderosa para explicar os padrões de velocidade e profundidade dos rios, tornando-se adequados para estudos em que estão previstas mudanças na estrutura do rio.

Um passo importante na realização de um estudo de modelação hidráulica é determinar os parâmetros pertinentes ao estudo e o modelo necessário para obter essas informações. Em estudos de habitats aquáticos seleccionar o modelo adequado não é tão simples. Factores como o estágio de vida e as espécies de organismos em estudo, determinam até que ponto e exactidão, a velocidade, profundidade, gradientes de velocidade, e localização dos padrões de escoamento, devem ser descritos (Crowder e Diplas 2000).

Um dos aspectos mais promissores dos estudos com modelos 2D de habitat é o seu potencial de quantificar e explicitar de forma precisa as variações espaciais e combinações de regimes de caudais importantes para a flora e fauna (Crowder e Diplas 2000). As interacções dinâmicas entre o caudal escoado, traduzido nas condições hidráulicas do troço, o sedimento e as características topográficas do leito, representam um papel importante na determinação das condições actuais de habitat num curso de água.

Os modelos bidimensionais (2D) hidráulicos e de habitat são utilizados para prever a velocidade e profundidade lateral e longitudinalmente, ao longo do comprimento do canal de rio, numa série de caudais, e combiná-los com substrato ou cobertura para prever o WUA (Gard 2009). Permitem lidar com habitats complexos, incluindo escoamentos transversais, variações na elevação da superfície da água entre canais e contracções/expansões de escoamentos (Ghanem *et al.* 1996).

O modelo River2D é um dos mais usados nos estudos de modelação fluvial para a avaliação do habitat piscícola (Boavida 2012).

### 2.2.2 O Modelo RIVER2D

O River2D (<http://www.river2d.ualberta.ca>) é um modelo bidimensional, de domínio público e foi desenvolvido numa colaboração entre o Freshwater Institute em Winnipeg (C. Katopodis), o Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Alberta em Edmonton (P. Steffler e muitos estudantes de pós-graduação), o Midcontinent Ecological Science Center da U.S. Geological Survey em Ft. Collins (T. Waddle), e a Fisheries Division do Alberta Government em Cochrane (A. Locke).

O modelo River2D simula as condições hidráulicas a partir de dados topográficos e utiliza curvas de preferência de habitat, contendo dados biológicos conhecidos, para calcular o potencial do habitat para os estágios de vida de espécies específicas, através da superfície ponderada útil (SPU) (Steffler e Blackburn 2002).

O modelo cria uma malha de elementos finitos composta por polígonos triangulares de diferentes formas e tamanhos. Em cada nó são simuladas as condições hidráulicas (profundidade média e velocidade média), e é estimado o valor potencial de habitat para diferentes espécies, e diferentes estágios de vida.

Referem-se algumas características específicas do River2D, tais como: a flexibilidade da malha permite uma simulação mais detalhada do escoamento em zonas de topografia complexa; a utilização do parâmetro índice de canal, no módulo de habitats, que pode incorporar a temperatura, substrato e cobertura (Lacey e Millar 2004); e o facto de durante a simulação permitir a visualização da evolução do nível das águas, da inundação progressiva das margens e o modo como varia a profundidade e a velocidade da água, em cada uma das células estabelecidas pelo modelo (Sanz e Jalón 2002). O programa permite ainda a visualização da distribuição de vários parâmetros hidráulicos, como a velocidade, profundidade, número de Froude, rugosidade do leito, profundidade e altura de escoamento.

O River2D é um modelo hidrodinâmico bidimensional e compõe-se de quatro sub-programas: o R2D\_Bed, o R2D\_Mesh, o R2D\_Ice e o River2D. Os três primeiros são editores de ficheiros gráficos.

O R2D\_Bed foi concebido para edição da topografia do leito do rio, enquanto o R2D\_Ice destina-se a desenvolver topografias de gelo. O programa R2D\_Mesh é utilizado para o desenvolvimento de malhas computacionais, que acabará por ser utilizada como *input* no River2D. Este último fornece, como *output*, a velocidade e profundidade em cada nó da malha. O River2D tem, ainda, associado um módulo de habitat para peixes, baseado na SPU do PHABSIM. Estes programas são normalmente utilizados em sucessão.

### 2.2.3 O Modelo CASIMIRFish2D

O Casimir (**C**omputer **A**ided **S**imulation **M**odel for **I**nstream **F**low **R**equirement**e**s) foi desenvolvido a partir dos anos noventa e focado essencialmente na simulação de habitats para organismos bentónicos (Jorde 1997), incluindo mais tarde a simulação da qualidade de habitat de peixes (Schneider 2001).

Este modelo foi projectado de forma modular, com ênfase no uso de características hidráulicas e morfológicas do canal, a fim de determinar a adequação de habitat para espécies piscícolas, quer através de funções de preferência univariadas, quer através da utilização de conhecimentos especializados com base em conjuntos e regras *fuzzy*.

Modelos de habitats anteriores têm-se centrado principalmente sobre as alterações à escala local, utilizando investigação de curto alcance (centenas de metros). O desenvolvimento do modelo de CasimirMeso visa aumentar a aplicação da modelação de habitat com base no conhecimento especialista, à escala regional (Schneider *et al.* 2010).

O módulo CasimirBenthos oferece a possibilidade de investigar a parte inferior do rio, a faixa de habitat para espécies bentónicas, como indicadores do funcionamento ecológico.

Na sequência da implementação de caudais ecológicos e com o objectivo de estudar os efeitos ao nível económico da produção de energia hidroeléctrica, a Universidade de Stuttgart desenvolveu o módulo CasimirHydropower. A versão actual permite calcular a produção energética para quaisquer combinações de hidrográficos e duração de descargas, simulando facilmente vários cenários de operações de uma central eléctrica (Schneider 2011).

CasimirFish é o módulo principal de Casimir, desenhado para avaliar as condições de habitat ao longo do canal de rio. Existe uma primeira versão, que envolve uma abordagem simples utilizando secções transversais para os cálculos ou medições de águas superficiais (1D), e uma versão que permite utilizar dados hidráulicos 2D, quando o rio apresenta uma geometria complexa. Podem igualmente necessitar da realização de cálculos hidráulicos utilizando modelos hidráulicos 1D, como HEC-RAS ou MIKE11, ou modelos hidráulicos bidimensionais, River2D ou HydroAS-2D.

A avaliação da conectividade do rio, estudos qualitativos e quantitativos de habitat, são algumas das aplicações típicas de CasimirFish. A qualidade de habitat pode ser quantificada através do uso da área ponderada útil (WUA – Weight Usable Area) ou do índice de adequação hidráulica de habitat (HHS – Hydraulic Habitat Suitability Index).

Schneider *et al.* (2012) a fim de estudar o impacto de eventos *hydropeaking* sobre peixes, nas diferentes fases do seu ciclo de vida, recorreram a uma simulação de adequação de habitat, baseada em lógica *fuzzy*, com recurso ao modelo Casimir, mas num ambiente de modelação GIS. Este novo módulo, CasimirGIS, permite incorporar parâmetros morfológicos e parâmetros dependentes do tempo.





## 3 Metodologia aplicada

No presente capítulo apresenta-se a metodologia seguida no desenvolvimento da modelação de habitat com o CasimirFish2D através da utilização de lógica *fuzzy*. Será descrito o processo de elaboração de conjuntos e regras *fuzzy*, assim como a aplicação destes.

### 3.1 Lógica *Fuzzy* ou Teoria de Conjuntos *Fuzzy*

A lógica *fuzzy* foi introduzida por Zadeh (1965) como uma extensão da teoria clássica de conjuntos, e é construída em torno do conceito de conjuntos *fuzzy* ou funções de associação (Adriaenssens *et al.* 2004). Estas funções de associação representam numericamente o grau de pertença de um elemento ao conjunto, denominado grau de associação.

Esta abordagem tanto permite combinar e processar informações subjectivas obtidas com base na longa experiência de especialistas, como observações objectivas e medições (Bock e Salski 1998).

A lógica *fuzzy* baseia-se em conjuntos e regras *fuzzy*. São regras linguísticas que descrevem a informação imprecisa que é muitas vezes característica de dados ecológicos, e permitem implementar interacções entre as variáveis físicas (Mouton *et al.* 2007).

A selecção de habitat e espécies pode ser feita de forma adequada com base na longa experiência de especialistas de ictiologia. No entanto, as preferências dos peixes dependem do seu estágio de vida e do tipo de rio, o que leva à definição de regras *fuzzy*, para diferentes espécies e fases de vida.

Os valores atribuídos às variáveis de *input* (e.g. profundidade, velocidade da corrente e substrato dominante) são definidos por conjuntos *fuzzy*.

Estes conjuntos são descritos através de funções de associação, indicando o grau de associação para cada valor da variável no conjunto. As fronteiras são sobrepostas, ou seja, um elemento pode pertencer parcialmente a um conjunto *fuzzy*, e consequentemente o seu grau de associação, a este conjunto, pode variar entre 0 e 1 (Mouton *et al.* 2007). As funções de associação são geralmente da forma trapezoidal e representam uma diminuição na incerteza envolvida na computação (Adriaenssens *et al.* 2004). A quantidade de sobreposição, a largura e a forma, dos conjuntos *fuzzy* devem ser considerados por um perito para cada variável *input*.

Em sistemas baseados em regras *fuzzy* o conhecimento é representado por regras “Se – Então”, compostas por duas partes: uma parte antecedente, geralmente constituída pelas condições das

variáveis *input*, e uma parte consequente, descrevendo os valores correspondentes à variável *output*, normalmente considerada uma única variável.

O modelo de habitat calcula o grau de associação de cada regra para uma determinada combinação de valores *input* (e.g. velocidade de 0,5 m/s, profundidade de 0,75 m e substrato de cascalho), para cada célula do troço de rio (Garcia 2011). Assim em cada célula, ao grau de associação dos valores dos conjuntos *fuzzy*, corresponde uma variável definida como o grau de cumprimento de cada regra. Este indica o impacte que a regra *fuzzy* tem sobre a adequação de habitat em cada célula, o *output*, que associa esta adequabilidade para a espécie em estudo, como o Índice de Adequação de Habitat (HSI) (Mouton *et al.* 2007).

Apresenta-se na figura 3.1, adaptada de Adriaenssens *et al.* (2004), um esquema geral de um modelo *fuzzy* com base nas variáveis do ecossistema. As variáveis *input* relevantes e disponíveis são seleccionadas e o seu domínio é dividido num número de conjuntos. Definem-se as regras linguísticas que relacionam as variáveis *input* com base no conhecimento de especialistas. Dados os valores particulares das variáveis *input*, o grau de cumprimento de uma regra resulta da associação destes valores para os respectivos conjuntos *fuzzy*. O *output* é determinado pelos graus de cumprimento e pela parte consequente das regras. Este *output* pode ser “desfuzzyficado”, e o modelo validado ou optimizado.

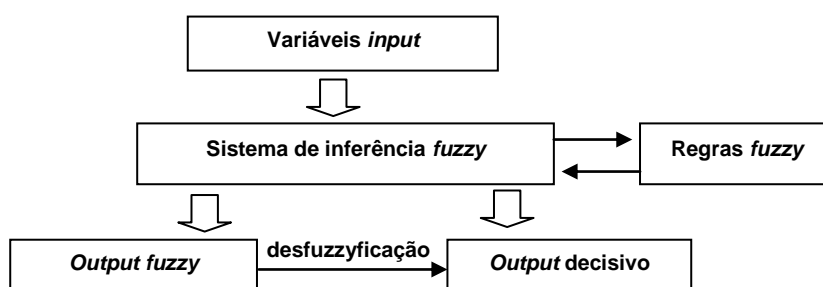


Figura 3.1. Lógica Fuzzy. Esquema geral de um modelo *fuzzy*. Adaptado de Adriaenssens *et al.* (2004).

Por vezes o *output* de modelos *fuzzy* resulta em mais informação que a necessária, e em muitas aplicações é desejado um *output* mais decisivo, para isso recorre-se à “desfuzzyficação”, sendo a fórmula do centro de gravidade a mais frequentemente referida como a utilizada para este processo.

Apresenta-se na figura 3.2 o procedimento generalizado que ocorre em CasimirFish2D. Considerando, como exemplo, um elemento individual com profundidade igual a 0,7 m e velocidade média igual a 0,6 m/s, e duas regras que o afectam, regra A e B. O modelo vai considera o menor grau de pertença da parte antecedente e define a área no conjunto HSI. Procedendo de forma similar com todas as regras que afectam o elemento individual, calcula a combinação máxima de produto e define o centro de gravidade entre as áreas, que corresponde ao valor de HSI do elemento.

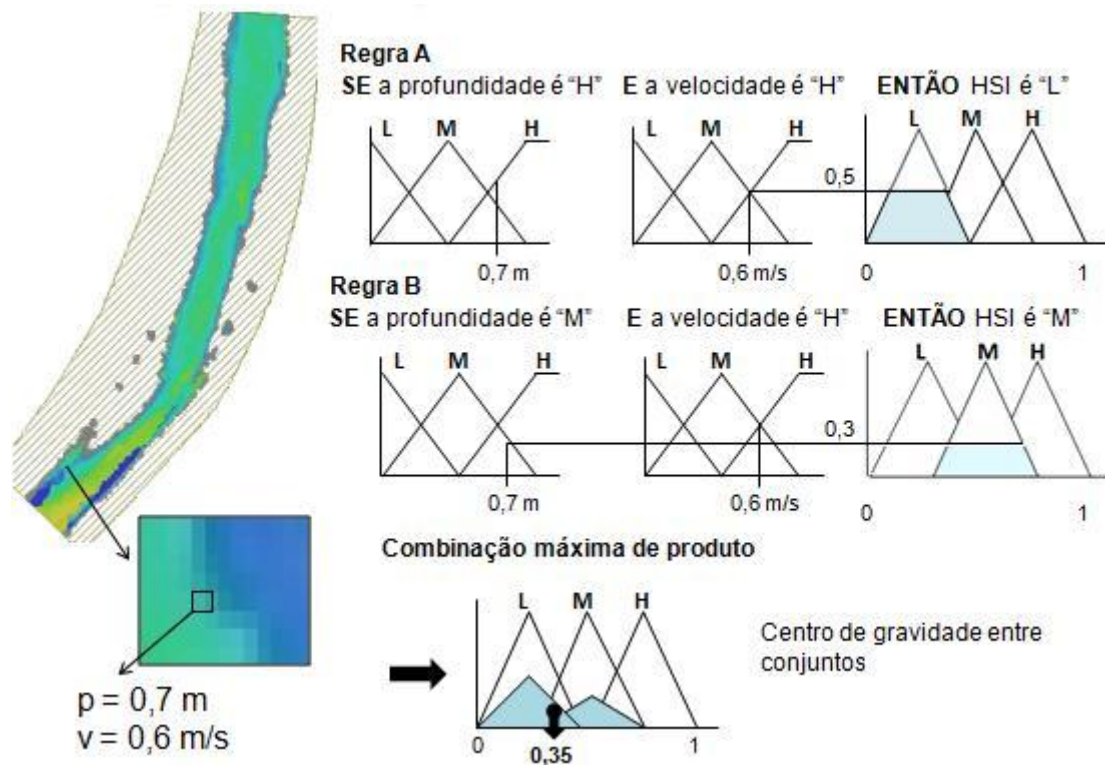


Figura 3.2. Lógica fuzzy. Procedimento generalizado que ocorre em CasimirFish2D. Adaptado de Schneider 2012.

Schneider (2010) refere as seguintes vantagens, como as principais, da utilização de um sistema fuzzy para simulações de adequação de habitat:

- O conhecimento existente dos requisitos específicos de habitat de organismos aquáticos, especialmente peixes, é comumente encontrado de forma qualitativa. Este tipo de informação pode ser processada numericamente no modelo através da utilização do conhecimento de especialistas com base em regras fuzzy.
- Esta abordagem é aplicável em situações de escassez de dados.
- Os cálculos baseados na lógica fuzzy podem ter em conta a interação de parâmetros, mas não requerem pressupostos relativamente à independência de parâmetros, ou seja, estes cálculos podem considerar efeitos multivariados.
- Com esta abordagem, parâmetros específicos adicionais podem ser facilmente incluídos pelo utilizador.
- O método de cálculo é relativamente directo e de fácil compreensão; os efeitos de interação de parâmetros específicos são replicáveis (não é uma "caixa negra").

- A calibração e adaptação a diferentes tipos de rio são viáveis através da modificação de conjuntos *fuzzy*.

No entanto a teoria de conjuntos *fuzzy* apresenta algumas desvantagens (Schneider 2012), nomeadamente sobre o conhecimento do especialista que deve ser verificado, assim como o facto deste conhecimento especializado não ser geralmente transferível.

### 3.3 Modelação de Habitat. CasimirFish2D.

A base da abordagem da lógica *fuzzy* em Casimir é os conjuntos *fuzzy*, que permitem a utilização de variáveis linguísticas (Schneider *et al.* 2010). Os gráficos abaixo mostram os conjuntos *fuzzy* padrão deste modelo (Figura 3.2).

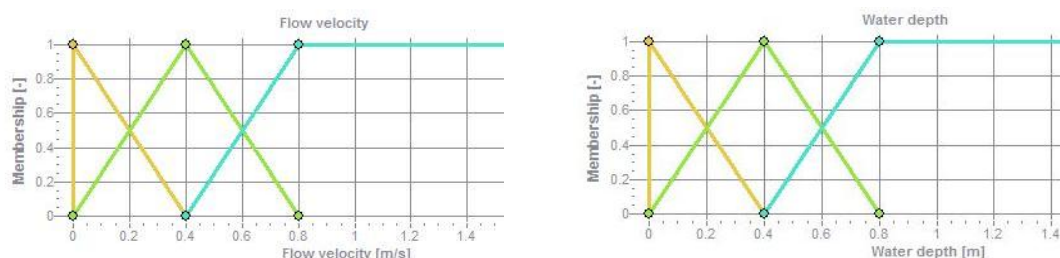


Figura 3.3. CasimirFish. Conjuntos *fuzzy* padrão. Adaptado de Schneider *et al.* 2010.

O centro do conjunto “medium” (linha verde) é definido com um valor de 0,4 m/s para a velocidade e 0,4 m para a profundidade. Não havendo fronteiras abruptas entre conjuntos, o valor de um parâmetro pode pertencer a mais do que um conjunto, expresso através de uma função de associação. Por exemplo, o valor de velocidade 0,2 m/s tem um grau de associação 0,5 no conjunto “low” (linha laranja), e um grau de 0,5 no “medium”. O *output* de adequação de habitat é também definido por conjuntos *fuzzy* simétricos.

Em CasimirFish o dispositivo matemático de lógica *fuzzy* assenta sobre a maioria dos centros de massa entre conjuntos que pode ser alcançada (Schneider *et al.* 2010).

O modelo Casimir permite trabalhar com lógica *fuzzy*, como já referido anteriormente, na simulação da qualidade de habitat, quantificada através do uso da área ponderada útil (WUA).

O valor WUA é obtido multiplicando a área de cada célula pelo seu valor de índice de adequação de habitat:

$$WUA = \sum_{i=1}^n A_i \cdot HSI_i = f(Q) \quad (m^2),$$

sendo  $HSI_i$  = índice de adequação de habitat para a i-ésima célula

$A_i$  = área da i-ésima célula

O WUA é expresso sob a forma de área ( $m^2$ ), tendo como valor máximo teórico a área molhada total, obtida se todas as células tiveram uma adequação de habitat igual a 1,0.



## 4 Caso de estudo. Ribeira de Odelouca

### 4.1 Considerações prévias

A área de estudo está localizada na ribeira de Odelouca, o maior afluente da Bacia do Arade (987 km<sup>2</sup>) no barlavento algarvio, no sudoeste de Portugal (Figura 4.1). Nasce na Serra do Caldeirão, no concelho de Almodôvar (freguesia de São Barnabé), percorrendo uma extensão de 92 km desde a nascente até à confluência com o rio Arade. No início corre no sentido leste-oeste até chegar às encostas da Serra de Monchique, onde inflecte o sentido para sudoeste e no final para sul.

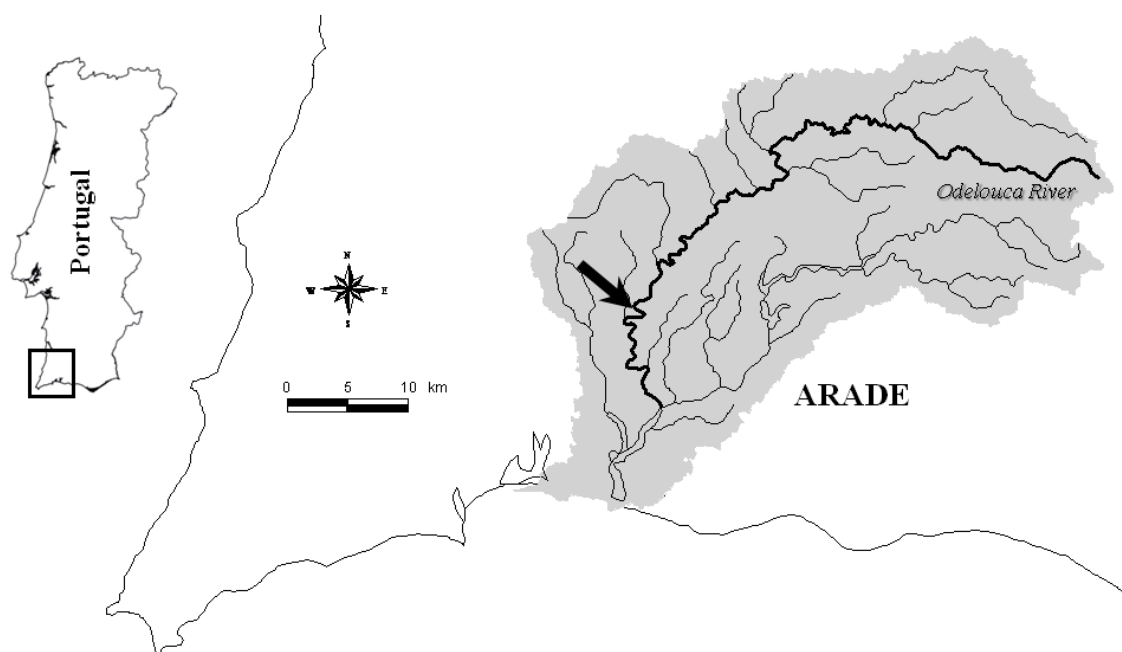


Figura 4.1. Mapa da localização área de estudo, mostrando a localização da ribeira de Odelouca e do troço em estudo.

A ribeira de Odelouca é dominada por rochas xistosas, cobertas por depósitos aluviais nas partes baixas. (Boavida *et al.* 2011).

O clima é mediterrânico, com uma grande variabilidade intra-anual, mais de 80% da precipitação ocorre entre Outubro e Março, quando os rios estão propensos a enchentes, mas de Julho a Setembro muitas partes do rio encontram-se parcialmente secas, resultando uma sucessão de piscinas no leito do rio (Santos e Ferreira 2008).

Os cursos médios e superiores, de alto valor de conservação, apresentam galerias ripícolas bem desenvolvidas dominadas por *Alnus glutinosa*, *Salix salviifolia* ssp. *australis* e *Fraxinus angustifolia* e estão livres dos principais impactes humanos, como a poluição urbana e agrícola, o represamento e a pesca (Boavida *et al.* 2011).

No curso inferior o uso da terra é principalmente agrícola. Extensos pomares de citrinos e culturas de irrigação ocupam a bacia inferior, substituindo a vegetação natural Mediterrânica e a floresta de sobreiro (*Quercus suber*). Os impactes destas actividades incluem a destruição e fragmentação dos bosques ripários, alisamento dos canais do rio e captação de água em piscinas ecológicas, alterando a hidromorfologia do rio e consequentemente diminuindo a heterogeneidade de habitat, levando a que espécies como a boga do sudoeste (*Iberochondrostoma almaca*) e o escalo do Arade (*Squalius aradensis*), outrora dominantes em toda a bacia, estejam quase ausentes na zona inferior (Cabral *et al.* 2006).

O relevo da bacia varia entre secções declivosas e vales com chão plano, permitindo a formação de meandros em troços longitudinais da ribeira.

A barragem de Odelouca encontra-se situada 2 km a montante da confluência com a ribeira de Monchique e possui, no coroamento da barragem, uma bacia hidrográfica de 395 km<sup>2</sup>. A barragem permite a criação de uma área inundada correspondente a 7,8 km<sup>2</sup>, com um volume equivalente a 157 hm<sup>3</sup> e uma capacidade útil de armazenamento de 134 hm<sup>3</sup>. Esta barragem, em conjunto com o túnel Odelouca - Funcho, integra o conjunto de obras do Aproveitamento Hidráulico Odelouca - Funcho, cujo objectivo é o abastecimento de água ao barlavento algarvio.

## 4.2 Enquadramento da área em estudo

### 4.2.1 Caracterização do troço em estudo

O troço em estudo situa-se cerca de 7 km a jusante da barragem de Odelouca, sendo caracterizado por uma bacia própria de 465,9 km<sup>2</sup>, com um caudal modular de 4,05 m<sup>3</sup>/s. O troço insere-se numa zona de agricultura intensiva associada à deterioração da cortina ripária. Esta degradação ribeirinha conduz à consequente instabilidade das margens e à intensa erosão fluvial, aspectos físicos que são comuns a muitas outras zonas existentes a jusante da implantação do empreendimento de Odelouca (Boavida 2007).

Dadas as suas características mediterrânicas, o escoamento é torrencial nos meses de Inverno e na época estival o leito apresenta pegos dispersos. Apresenta alguns mesohabitats diferentes, destacando-se rápidos, *pools* e *riffles*.



O segmento apresenta uma largura média que varia entre 7 e 30 m, sendo o declive médio do leito aproximadamente  $0,0035 \text{ mm}^{-1}$ .



(a)



(b)

**Figura 4.2.** Ribeira de Odelouca. Vista geral do troço em estudo. Vista para montante (a). Vista para jusante (b).

A profundidade do canal varia entre 0,2 m e 1 m.

O leito em relação à sua rugosidade é caracterizado essencialmente, pela presença de calhau rolado com um diâmetro médio de 0,1 m, existindo pontualmente, nas margens, blocos de calcário que atingem 0,5 a 0,7 m de diâmetro equivalente.



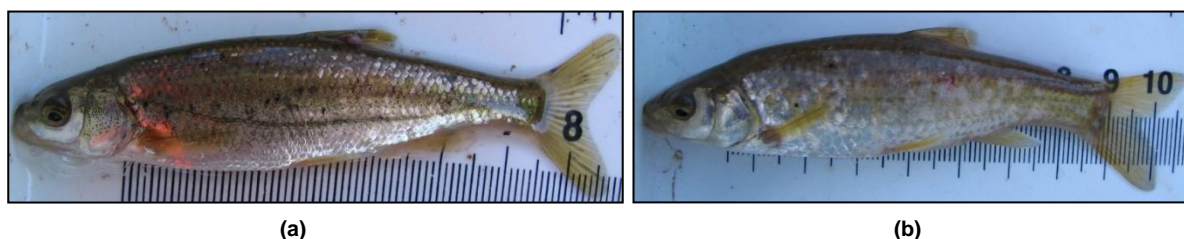
**Figura 4.3.** Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Material do leito: blocos de calcário nas margens.

## 4.2.2 Caracterização das espécies

As bacias ibéricas do sul, caracterizadas por flutuações climatéricas anuais e sazonais extensas, marcadamente mediterrânicas, são de alta prioridade de conservação devido à presença de espécies endémicas com distribuição muito restrita, em muitos casos limitada a uma bacia ou uma porção única da mesma (Pires *et al.* 2004). Neste contexto, e devido ao isolamento frequente de troços fluviais em pegos, em consequência de um défice estival de caudal, são frequentes os fenómenos de divergência genética e diferenciação de novas espécies (Mesquita *et al.* 2001).

A alteração do regime hidrológico do rio, consequência da construção de barragens, e a proliferação de espécies exóticas, causam uma perda importante na área de ocupação de espécies de peixes, nomeadamente do escalo do Arade e da boga do sudoeste (Cabral *et al.* 2006). São consideradas ainda como causas da degradação de habitat a extracção de inertes, a captação de água e a perda de qualidade da água.

O escalo do Arade, *Squalius aradensis*, e a boga do sudoeste, *Iberochondrostoma almakai*, são duas espécies ciprinícolas endémicas, consideradas “criticamente em perigo” (CR) no Livro Vermelho dos Vertebrados de Portugal, encontradas exclusivamente em pequenas bacias do sudoeste de Portugal (Cabral *et al.* 2006) (Figura 4.4). Estes endemismos têm uma ocorrência e área de ocupação extremamente reduzidas, com cerca de 15 km<sup>2</sup>, admitindo-se um declínio continuado. Ocorrem especialmente em rios e ribeiras intermitentes, sendo que o escalo prefere locais com velocidade de corrente moderada e substrato de elevada granulometria, enquanto a boga prefere locais com água de temperatura relativamente elevada e alguma profundidade (Pires *et al.* 2004).



**Figura 4.4.** Ribeira de Odelouca. Boga do sudoeste (*Iberochondrostoma almakai*) (a) e Escalo do Arade (*Squalius aradensis*) (b).

As duas espécies utilizam microhabitats distintos, embora possa ocorrer alguma sobreposição no Verão. A boga encontra-se geralmente associada a profundidades moderadas (5,5 a 7 cm de tamanho, juvenis) e microhabitats de elevada cobertura com substrato de pequenas dimensões, admitindo-se que apresenta um comportamento limnofílico (Santos e Ferreira 2008). O escalo encontra-se associado a substratos grosseiros, pelo menos durante a Primavera, provavelmente relacionado com o período reprodutivo (Março a Maio). Esta espécie é sugerida como reprodutora litófila, favorecida pela existência de leitos de cascalho (Santos e Ferreira 2008).

## 4.3 Trabalhos de campo

### 4.3.1 Recolha de dados

Os trabalhos de campo no troço em estudo da ribeira de Odelouca compreenderam o levantamento topográfico do segmento em estudo, a determinação da rugosidade (k), das curvas de preferência de habitat para a boga e o escalo do Arade, a caracterização do índice do canal (substrato) e a recolha de dados hidráulicos determinantes para a modelação do habitat.

A área de influência acima do local de estudo é de 466 km<sup>2</sup>, com um caudal médio anual de 4,05 m<sup>3</sup>/s.

O levantamento topográfico foi realizado pelo Centro de Estudos em Gestão de Ecossistemas da UTAD em Março de 2005, com uma Nikon DTM310 total station combinada com um Sistema de Posicionamento Global (GPS; Ashtechy, modelo Pro Mark2). Os dados gerais do levantamento topográfico foram os seguintes:

- Área total do levantamento 17 354 m<sup>2</sup>
- Perímetro total do levantamento 681 m
- Pontos validados 4 129
- Densidade média 0,24 pontos/m<sup>2</sup> ou 1 ponto por célula com base quadrada com lado 2,0 m.

A caracterização do coeficiente de rugosidade foi feita com base nos diâmetros do material, por inspecção visual. Os valores identificados encontram-se numa gama de valores de 0,1 a 0,5 m.

O substrato foi caracterizado por inspecção visual e através da medição dos diâmetros do material do leito do rio. Foram tidas em conta as seguintes classes de substrato (Bain e Stevenson 1999) (Quadro 4.1):

**Quadro 4.1. Classes de substrato (Bain e Stevenson 1999).**

Código	Descrição do substrato	Dimensões
1	Matéria orgânica	...
2	Vasa	1 – 2 mm
3	Areia	2 – 5 mm
4	Gravilha	5 – 25 mm
5	Cascalho	25 – 50 mm
6	Pedras	50 – 100 mm
7	Blocos	100 – 250 mm
8	Rocha	>250 mm

Estas classes de substrato estiveram na base do desenvolvimento das regras e conjuntos *fuzzy* (Santos 2012). No troço em estudo foram identificadas quatro classes: 1 (matéria orgânica), 5 (cascalho), 6 (pedras) e 7 (blocos).

A recolha de dados hidráulicos teve lugar em Janeiro de 2007, na mesma altura em que se realizou a caracterização da rugosidade e o substrato. Foram realizadas medições em quatro secções transversais, de forma a serem representativas dos mesohabitats existentes no troço (Boavida *et al.* 2011) (Quadro 4.2).

**Quadro 4.2. Mesohabitats das quatro secções transversais do troço em estudo da ribeira de Odelouca.**

Secção transversal	Mesohabitat
1 (jusante)	<i>Pool</i>
2	<i>Pool</i>
3	Rápido
4 (montante)	<i>Riffle</i>

A intersecção de cada secção transversal com as margens foi georreferenciada com recurso a um GPS, Etrex Legend da Garmin.

As características hidráulicas foram medidas segundo uma malha horizontal que teve em conta a irregularidade do leito e a uniformidade dos parâmetros hidráulicos. Nas zonas mais complexas, de características irregulares, criou-se uma malha com 0,5 m de lado e, nas zonas do leito regular, uma outra malha de 1 m de lado.

A medição da velocidade foi realizada a vau, utilizando uma sonda ultrasónica, FP101 Global Flow Probe da Global Water. Para profundidades inferiores a 0,8 m, a velocidade média da corrente foi medida a 60% da distância a partir da superfície da água para o leito do rio, nos outros casos a velocidade foi considerada como a média das medições feitas a 20% e 80% do total da profundidade.

A altura de escoamento foi medida com uma régua graduada em cada vertical da secção transversal.

Foi definida como a secção de saída a secção transversal situada mais a jusante na zona de *pool*, visto que a regularidade do leito e a baixa velocidade permitiram supor que esta secção apresentava resultados hidráulicos consistentes para determinar a curva de vazão.

Boavida (2007) refere que as medições de dados num rio estão sujeitas a erros de recolha que poderão influenciar de certa forma o processo de calibração e consequentemente os resultados do modelo, e apresenta uma síntese das possíveis origens desses erros:

- i. O levantamento topográfico e as medições de profundidade e velocidade foram realizados em épocas diferentes. No período compreendido entre os trabalhos de campo decorreram dois Invernos, um dos quais particularmente chuvosos, designadamente 2006, que neste rio tipicamente mediterrânico são caracterizados por chuvas intensas que originam fortes escoamentos susceptíveis de alterar a morfologia do curso de água, podendo eventualmente modificar a delimitação das margens.

ii. Existe um erro associado à visualização dos valores de profundidade na régua graduada, que é mais significativo nas zonas de rápido e nos *riffles*. Para colmatar este erro foram realizadas medições a montante e a jusante da régua graduada, e calculada a respectiva média.

iii. A medição da velocidade foi realizada com a maior precisão possível, com o eixo do velocímetro direccionado para a linha preferencial do escoamento. Em algumas secções transversais, nomeadamente nas secções transversais números 3 e 4 (*riffle* e rápido), a direcção de escoamento não é única, o que dificulta as medições.

iv. A existência de uma obstrução ao escoamento (calhau de maiores dimensões) a montante da zona de medição influencia os valores de velocidade medidos nesse ponto. Para ultrapassar este problema foram tidos especiais cuidados nos locais escolhidos para efectuar as medições.

v. Os erros associados ao cálculo são pequenos, no entanto, como as variáveis inerentes ao cálculo do caudal já têm um erro de medição associado, o valor final vem afectado de erro. Porém, os valores de caudal obtidos para todas as secções foram similares, encontrando-se os maiores desvios nas secções transversais números 3 e 4 (*riffle* e rápido), onde as medições são susceptíveis de apresentarem maiores erros.

## 4.4 Modelação hidrodinâmica – River 2D

A obtenção do ficheiro hidrodinâmico segue um conjunto de fases sequenciais. Primeiro elabora-se o ficheiro topográfico no programa R2D\_Bed; a partir desse ficheiro cria-se a malha de elementos finitos no programa R2D\_Mesh; a modelação hidrodinâmica do escoamento tem lugar no programa River2D (Steffler e Blackburn 2002).

Os dados necessários à modelação bidimensional são o levantamento topográfico do troço (coordenadas xy e a cota z do terreno), a caracterização da rugosidade, identificação do substrato e determinação da curva de vazão na secção de saída, de modo a estabelecer as condições de fronteira (caudal na secção de entrada e cota da superfície livre na secção de saída).

Para proceder à calibração do modelo, são ainda necessários dados relativos às alturas de escoamento e velocidades médias para determinados caudais, medidos em secções transversais e longitudinais.

A modelação hidrodinâmica, utilizando o River2D, envolve a criação de um ficheiro topográfico, a elaboração de uma malha de elementos finitos e a calibração do modelo no que respeita a valores de rugosidade e afinação da malha.

A calibração do modelo tem como objectivo ajustar as alturas de escoamento simuladas e as alturas de escoamento medidas tendo em consideração também a comparação dos perfis de velocidade medidos e simulados.

Para calibrar o modelo, uma série de pontos foram localizados ao longo de secções transversais, onde significativas alterações na composição profundidade, substrato velocidade da água, e inclinação foram anotados (Boavida *et al.* 2011). O modelo foi calibrado para o caudal 2,05 m<sup>3</sup>/s.

Uma vez concluída a calibração, foi corrido o modelo para obter os valores de profundidade e velocidade em cada nó da malha, para a gama de caudais de interesse.

Foram simulados os valores do caudal entre 0,1 e 12 m<sup>3</sup>/s, uma vez que, a partir dos 12 m<sup>3</sup>/s, não se justifica continuar a simular por estarmos perante caudais não expectáveis neste curso de água (Boavida *et al.* 2011).

## 4.5 Modelação do habitat para peixes – CasimirFish2D

CasimirFish2D foi o modelo bidimensional utilizado para prever a adequabilidade de habitat para o escalo e a boga. Esta adequabilidade foi simulada com base em condições hidráulicas, conjuntos e regras *fuzzy*.

Numa primeira fase, depois de disponibilizados os dados hidráulicos obtidos no River2D, definiram-se os conjuntos e regras *fuzzy* (Santos 2012), com base no conhecimento de especialistas e literatura. Estes conjuntos e regras foram associados a cada caudal e no final foi calculado o WUA.

A caracterização do substrato foi feita através da delimitação de polígonos, nas áreas de substrato homogéneo com dimensão significativa, considerando as mesmas classes de substrato utilizadas no desenvolvimento dos conjuntos e regras *fuzzy*.

O cálculo da WUA foi efectuado, para os diferentes estágios do ciclo de vida, estratificando os peixes em três classes de tamanho com base nas diferenças de comprimento, estrutura e idade: <4,4 – 6> 6 cm para o escalo e <5,5 – 7> 7 cm para a boga. Estes correspondem aproximadamente aos estágios de vida, alevim (0 +), juvenil (1 +) e adulto (> 1 +), respectivamente (Santos e Ferreira 2008). A fim de avaliar o impacte da regulação hidrológica, neste caso da barragem de Odelouca, foram realizados os cálculos para o regime de caudais naturais e para o regime de caudais regulados.

Foi determinado o regime de caudais naturais na secção em estudo com base nos registos históricos da Estação Hidrométrica (EH) de Monte dos Pachecos, da responsabilidade do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH). A EH localiza-se a cerca de 5 km a montante do local de

estudo, e a jusante da confluência da ribeira de Monchique com a ribeira de Odelouca. Os caudais médios mensais da EH foram extrapolados para o troço em estudo, multiplicando-os por um factor de ajustamento, equivalente ao quociente entre a área das bacias hidrográficas, da EH (451 km<sup>2</sup>) e do troço em estudo (466 km<sup>2</sup>) (Boavida 2007). No quadro 4.3 apresentam-se os caudais médios mensais no troço em estudo.

**Quadro 4.3. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Caudais médios mensais (m<sup>3</sup>/s). Adaptado de Boavida (2007).**

	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Qmod
Caudal	1,6	8,01	12,14	11,12	11,64	6,16	3,04	0,94	0,2	0,02	0,00	0,00	4,05

Visto que o troço se encontra a jusante da confluência da ribeira de Monchique com a ribeira de Odelouca, e verificando-se uma contribuição elevada desta ribeira, foi aferido a contribuição da bacia hidrográfica própria (sem contabilizar os escoamentos provenientes da barragem) no troço em estudo, através do cálculo do caudal modular desta bacia, a partir das curvas de isolinhas de escoamento do Atlas do Ambiente do Instituto do Ambiente (IA). Tendo em conta a distribuição mensal dos escoamentos na EH de Monte de Pachecos, foram calculados os caudais médios mensais provenientes da bacia própria (Boavida 2007), apresentados no quadro 4.4.

**Quadro 4.4. Ribeira de Odelouca. Caudais médios mensais (m<sup>3</sup>/s) provenientes da bacia própria. Adaptado de Boavida (2007).**

	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Qmod
Caudal	0,35	1,74	2,63	2,41	2,52	1,33	0,66	0,20	0,04	0,00	0,00	0,00	0,88

A fim de determinar os caudais médios mensais naturais a montante da barragem foram subtraídos aos caudais médios mensais naturais no troço em estudo, os caudais médios mensais provenientes da bacia própria. Apresentam-se no Quadro 4.5 os caudais médios mensais naturais a montante da barragem.

**Quadro 4.5. Ribeira de Odelouca. Caudais médios mensais a montante da barragem (m<sup>3</sup>/s). Caudais naturais.**

	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set
Caudal	1,25	6,27	9,51	8,71	9,12	4,83	2,38	0,74	0,16	0,02	0,00	0,00

Os caudais médios mensais regulados foram determinados com base nos caudais ecológicos, caudais a garantir a jusante da barragem de Odelouca, e fornecidos pelo Departamento de Ordenamento e Regulação do Domínio Hídrico, do Instituto da Água, I. P., adicionando a estes os caudais médios mensais provenientes da bacia própria, a fim de se obter os caudais regulados que chegam ao troço em estudo (Quadro 4.6).

Quadro 4.6. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Caudais médios mensais regulados ( $\text{m}^3/\text{s}$ ). Caudais regulados.

	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set
Caudal	0,50	2,50	3,72	3,50	4,02	2,83	1,36	0,50	0,24	0,02	0,00	0,00

### 4.5.1 Conjuntos *Fuzzy*

Os valores atribuídos às três variáveis *input*, profundidade, velocidade e substrato foram definidos por conjuntos *fuzzy* e não por conjuntos convencionais com fronteiras nítidas.

Um conjunto *fuzzy* é descrito através de funções de associação, indicando o grau de pertença (*membership degree*) para cada valor da variável neste conjunto. As fronteiras dos conjuntos são sobrepostas, ou seja, um elemento pode pertencer parcialmente a um conjunto *fuzzy*, e consequentemente o seu grau de pertença, a este conjunto, pode variar entre 0 e 1 (Mouton *et al.* 2007). Os conjuntos *fuzzy* foram definidos de acordo com a metodologia apresentada na alínea 3.3, com funções de associação de forma trapezoidal como mostradas na Figura 4.5.

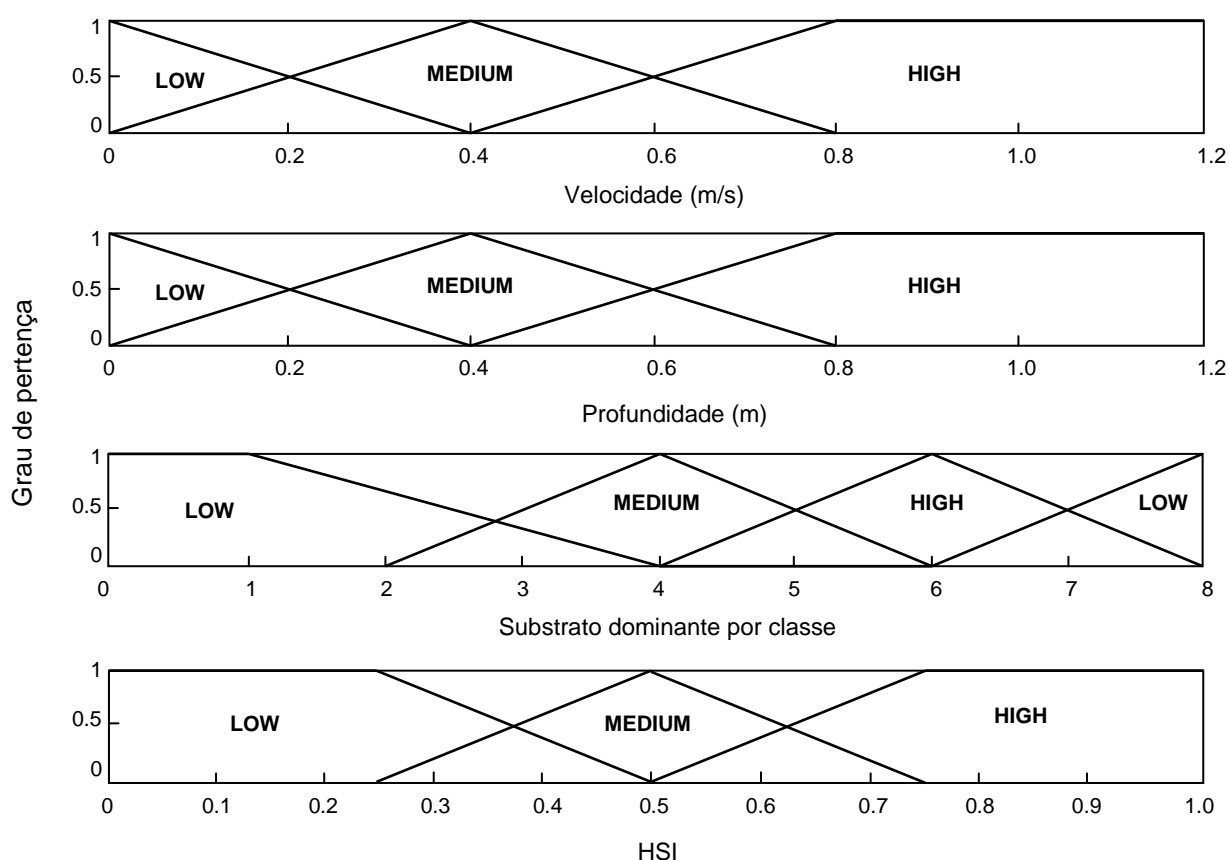


Figura 4.5. Conjuntos *Fuzzy* das variáveis *input*, velocidade, profundidade e substrato, e da variável *output*, índice de adequação de habitat (HSI) para a Boga e o Escalo.



### 4.5.2 Regras *Fuzzy*

A base das regras *fuzzy* é ligar as variáveis *input* de acordo com a adequação de habitat (Mouton *et al.* 2007) para as espécies em estudo, e consiste em regras “se – então”, como por exemplo, “Se a velocidade é elevada, a profundidade moderada e o substrato elevado, *então* o habitat é adequado”. A parte “se” (antecedente) da regra descreve a situação em que esta regra se aplica, enquanto que a parte “então” (consequente) indica se o habitat nessa situação é adequado ou não para os diferentes estágios de vida da boga e do escaló.

Todas as combinações devem ser analisadas para cada estágio de vida da espécie, com base na bibliografia, dados recolhidos no local e experiência de especialistas (Mouton *et al.* 2007), assim gerando um total de 27 regras (3 variáveis com 3 expressões linguísticas) por estágio de vida da espécie. Os quadros 4.3 e 4.4 apresentam as regras *fuzzy* definidas para a boga e para o escaló (Santos 2012).

**Quadro 4.3. Regras *fuzzy* para a Boga. L = Low (baixo); M = Medium (moderado); H = High (elevado).**

Velocidade	Profundidade	Substrato dominante	HSI		
			Alevins	Juvenis	Adultos
L	L	L	H	M	M
L	L	M	H	M	H
L	L	H	M	L	M
L	M	L	H	M	H
L	M	M	L	H	M
L	M	H	M	M	M
L	H	L	M	L	M
L	H	M	M	M	M
L	H	H	H	L	L
M	L	L	H	M	H
M	L	M	L	H	H
M	L	H	M	M	M
M	M	L	L	H	H
M	M	M	L	H	M
M	M	H	M	M	M
M	H	L	M	M	M
M	H	M	L	M	M
M	H	H	L	L	M
H	L	L	M	L	M
H	L	M	M	M	M
H	L	H	L	L	L
H	M	L	M	M	M
H	M	M	L	M	M
H	M	H	L	L	M
H	H	L	L	L	L
H	H	M	L	L	M
H	H	H	L	L	L

Quadro 4.4. Regras *fuzzy* para o Escalo. L = Low (baixo); M = Medium (moderado); H = High (elevado).

Velocidade	Profundidade	Substrato dominante	HSI		
			Alevins	Juvenis	Adultos
L	L	L	H	L	L
L	L	M	H	L	L
L	L	H	M	L	L
L	M	L	H	L	L
L	M	M	M	M	L
L	M	H	L	M	M
L	H	L	M	L	L
L	H	M	L	M	M
L	H	H	L	M	M
M	L	L	H	L	L
M	L	M	M	M	L
M	L	H	L	M	M
M	M	L	M	M	L
M	M	M	L	H	M
M	M	H	L	H	H
M	H	L	L	M	M
M	H	M	L	H	H
M	H	H	L	H	H
H	L	L	M	L	L
H	L	M	L	M	M
H	L	H	L	M	M
H	M	L	L	M	M
H	M	M	L	H	H
H	M	H	L	H	H
H	H	L	L	M	M
H	H	M	L	H	H
H	H	H	L	M	H

## 5 Resultados

Apresentam-se os resultados do modelo para o caudal  $2,05 \text{ m}^3/\text{s}$ , relativamente aos parâmetros velocidade (Figura 4.6) e profundidade (Figura 4.7).

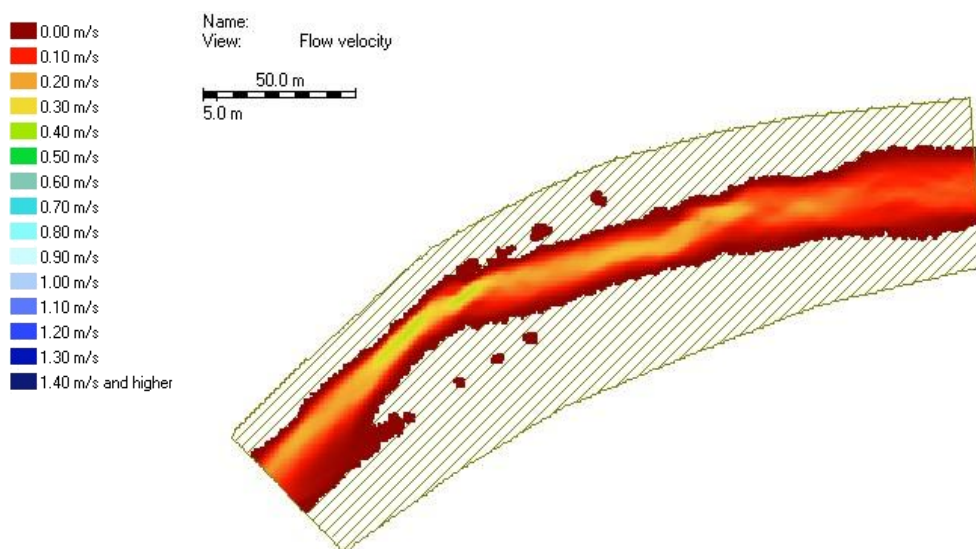


Figura 4.6. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Distribuição da velocidade (m/s) ( $Q = 2,05 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

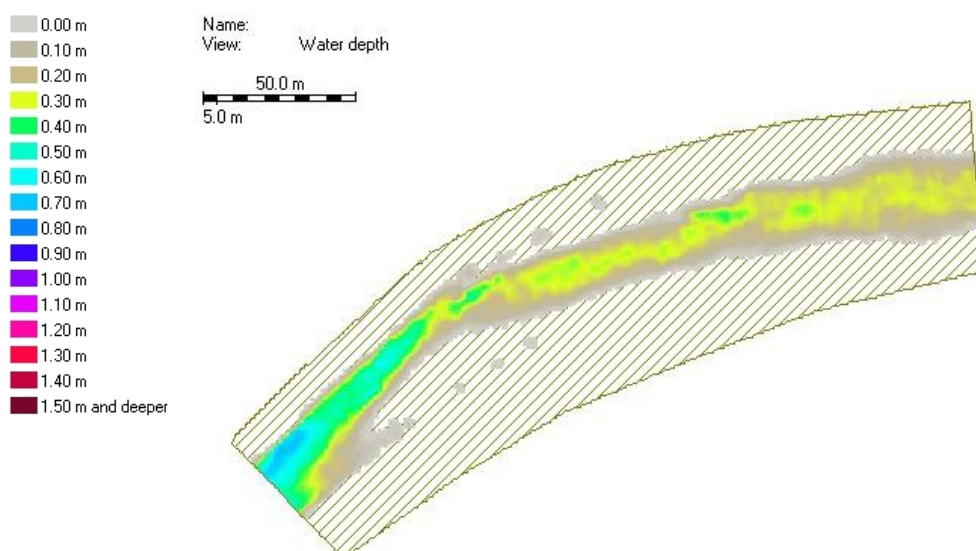


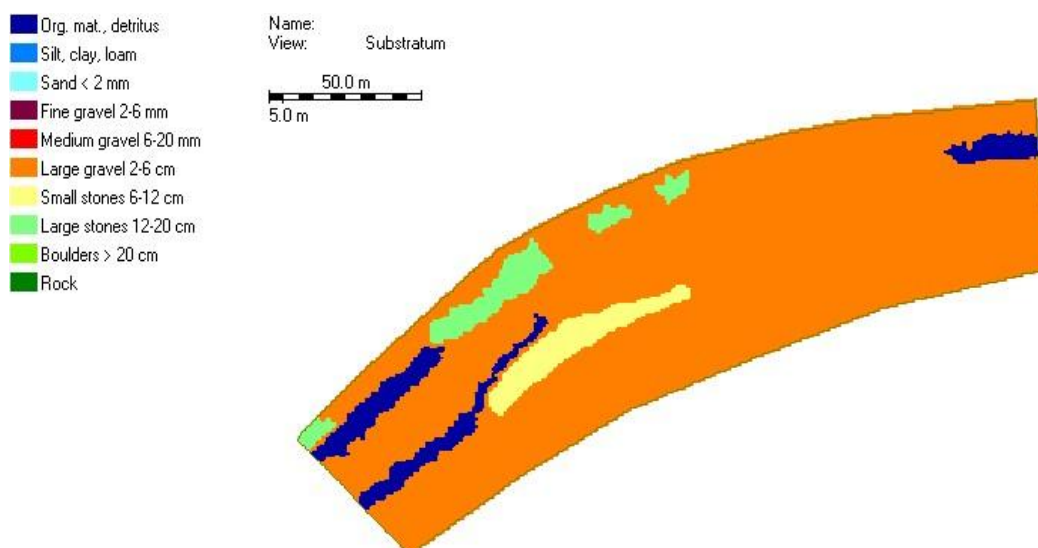
Figura 4.7. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Distribuição da profundidade (m) ( $Q = 2,05 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Verifica-se, pela Figura 4.6 e Figura 4.7, que as zonas mais profundas correspondem a menores velocidades, sendo que na zona de curvatura do leito encontram-se, simultaneamente, zonas de velocidade moderada a alta, e baixa profundidade. Nas margens as velocidades são mais baixas, correspondendo também às zonas de menor profundidade.

A modelação do habitat para peixes foi feita com base em conjuntos e regras *fuzzy*, desenvolvidas por um especialista (Santos 2012).

A caracterização do substrato foi feita através da delimitação de polígonos, nas áreas de substrato homogêneo com dimensão significativa, considerando as mesmas classes de substrato utilizadas no desenvolvimento dos conjuntos e regras *fuzzy*.

Foram identificadas quatro classes de substrato: 1 (matéria orgânica), 5 (cascalho), 6 (pedras) e 7 (blocos). A distribuição do substrato no troço da ribeira de Odelouca encontra-se na Figura 4.8.



**Figura 4.8. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Distribuição de substrato.**

A matéria orgânica identificada encontra-se junto às margens em algumas zonas do troço, onde também se registam pontualmente a presença de blocos que, em situações de caudais superiores, podem servir de refúgio para os peixes.

A cada caudal foram associadas os conjuntos e regras *fuzzy* e calculada Área Ponderada Útil. Em anexo apresenta-se a título de exemplo, os conjuntos (Quadro A4.1) e as regras *fuzzy* (Quadro A4.2) para a boga adulto, na forma como são introduzidos no CasimirFish2D.

A adequabilidade de habitat físico, para o escalo é apresentada na Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11, considerando  $Q=2,05 \text{ m}^3/\text{s}$ , para os três estágios do ciclo de vida (adulto, juvenil e alevim).

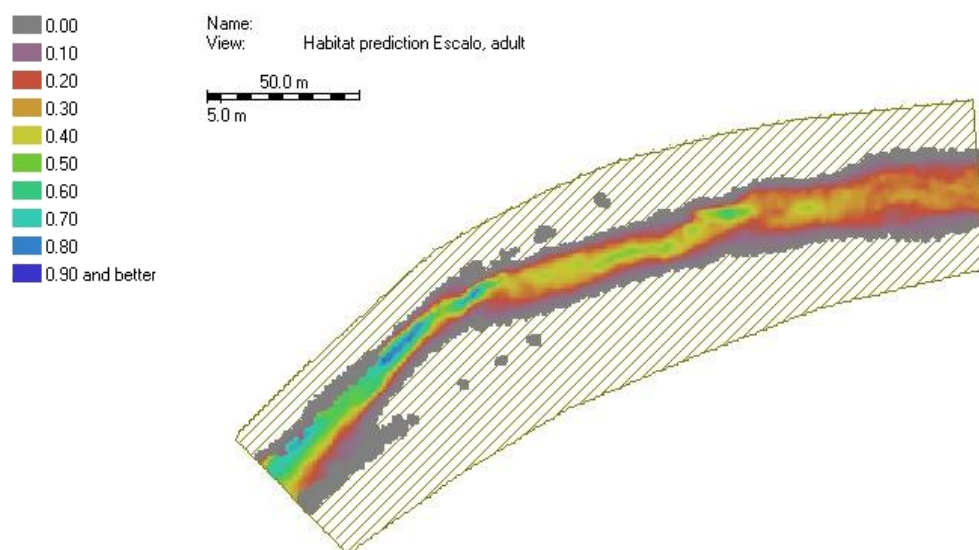


Figura 4.9. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Adequabilidade de habitat físico para o escalo adulto (HSI).

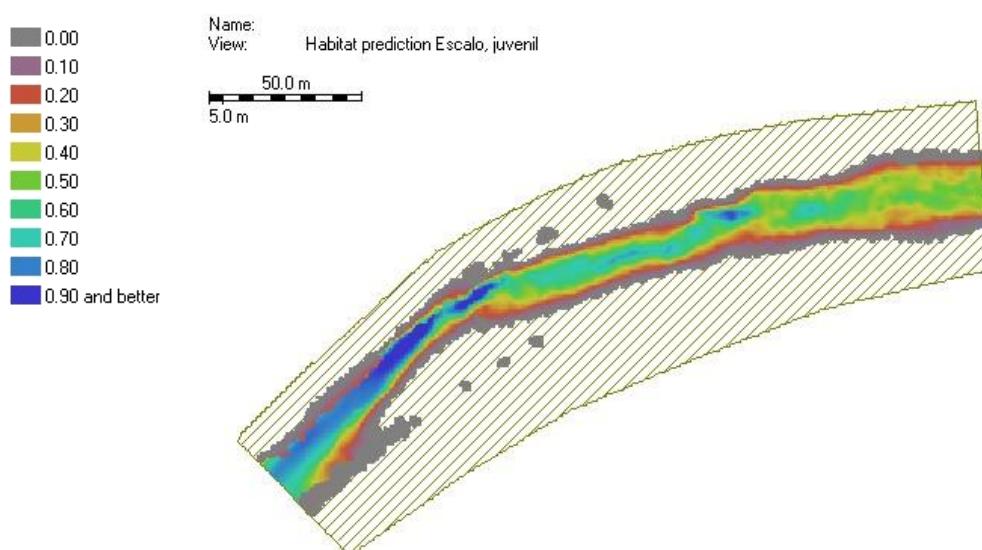
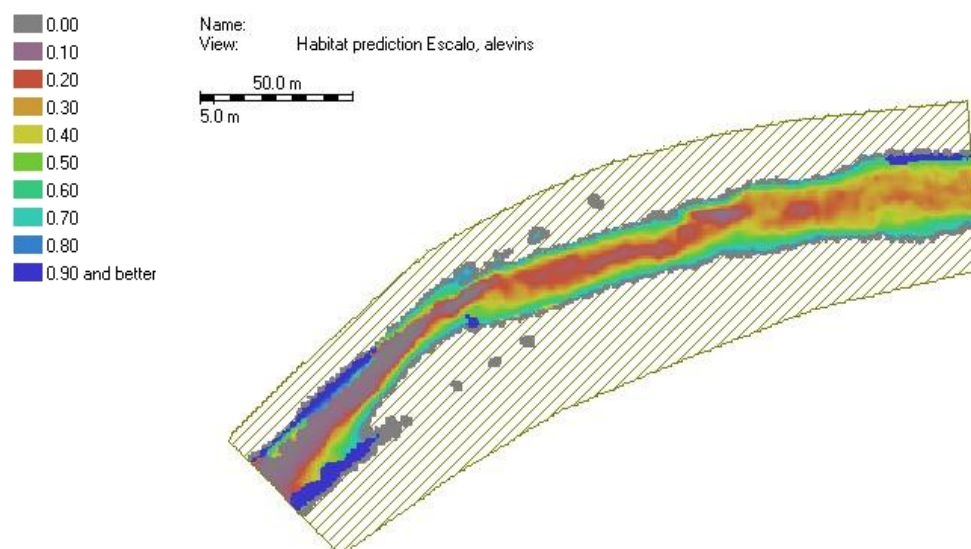


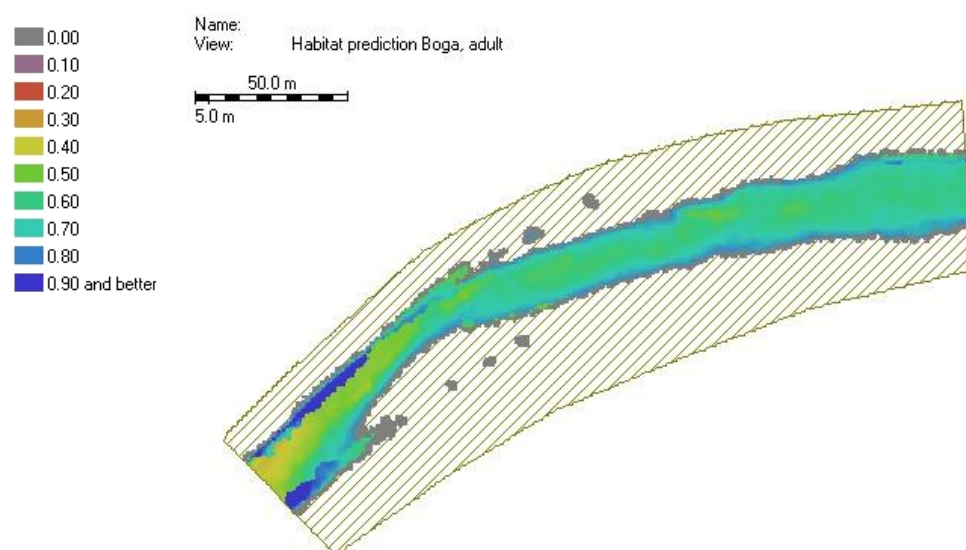
Figura 4.10. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Adequabilidade de habitat físico para o escalo juvenil (HSI).



**Figura 4.11. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Adequabilidade de habitat físico para o escalão alevim (HSI).**

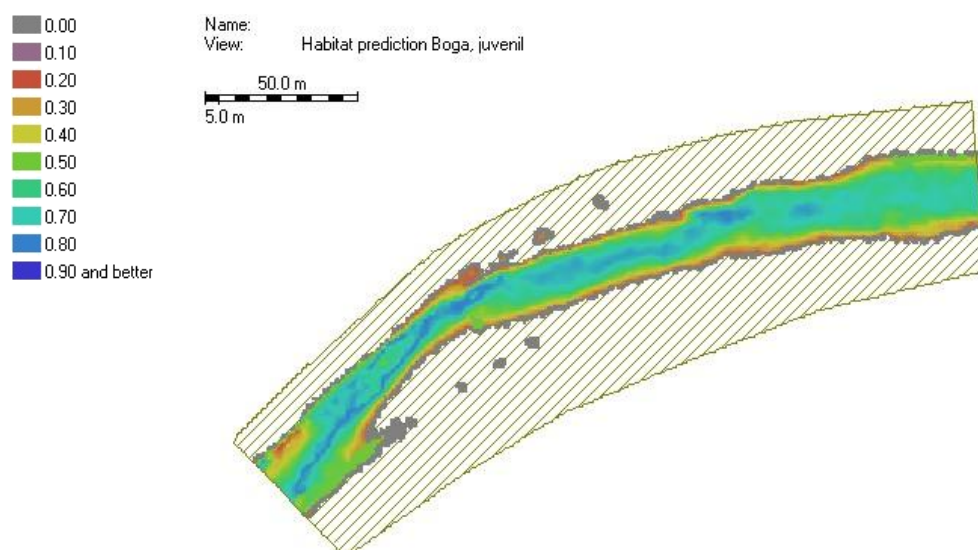
O escalão adulto e juvenil encontra-se associado a profundidades e velocidades mais elevadas que o escalão alevim (Figuras 4.9 e 4.10). A adequabilidade de habitat para o escalão alevim concentra-se junto às margens, nas zonas onde o substrato é orgânico, e a velocidade e profundidade baixas, conforme se pode verificar cruzando os dados das Figuras 4.11 com os dados das Figuras 4.6 (velocidade ao longo do troço), Figura 4.7 (profundidade ao longo do troço) e Figura 4.8 (substrato ao longo do troço).

Os resultados da adequabilidade de habitat físico para a boga são apresentados na Figura 4.12, Figura 4.13 e Figura 4.14, considerando  $Q=2,05 \text{ m}^3/\text{s}$ , para os três estágios do ciclo de vida (adulto, juvenil, alevim).

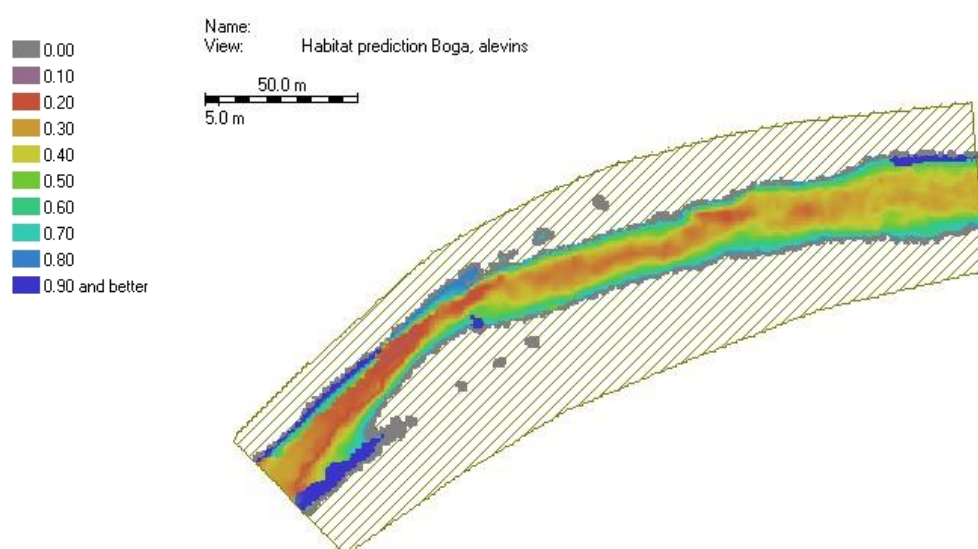


**Figura 4.12. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Adequabilidade de habitat físico para a boga adulta (HSI).**





**Figura 4.13. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Adequabilidade de habitat físico para a boga juvenil (HSI).**



**Figura 4.14. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Adequabilidade de habitat físico para a boga alevim (HSI).**

A adequabilidade de habitat para a boga encontra-se dependente do substrato orgânico presente mais a jusante do troço, e junto às margens, onde predomina este tipo de substrato. A boga adulto e juvenil apresenta uma adequabilidade de habitat mais uniforme (Figuras 4.12 e 4.13) ao longo do troço, comparativamente à boga alevim. A boga alevim encontra-se associada a velocidades e profundidades baixas, junto às margens (Figura 4.14).

A Figura 4.15 mostra as áreas com o mesmo valor de HSI, em função do caudal, através de percentagem, para o escalo, considerando as três fases do seu ciclo de vida.

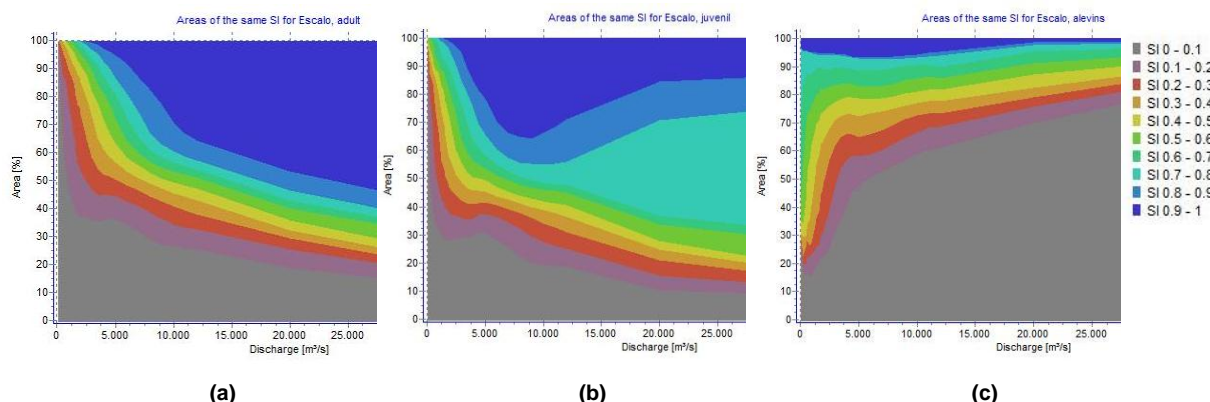


Figura 4.15. Áreas com o mesmo valor de HSI, em função do caudal, através de percentagem (%) para o escalo, adulto (a), juvenil (b) e alevim (c).

Verifica-se, na Figura 4.15, que para o escalo adulto a área com valores de HSI mais elevados (0,9 - 1) aumenta com o caudal, não se verificando este padrão para os juvenis e alevins. Estes últimos a partir de determinado caudal, onde a percentagem de área com valores de HSI elevados é máxima, apresentam um acréscimo de área com valores de HSI reduzidos. Para um caudal de 5 m³/s a porção de área com valores de HSI menores (0 – 0,4) representa aproximadamente 50% da área disponível para o escalo juvenil, mas 80% para o escalo alevim. O escalo juvenil e adulto estão mais dependentes do valor de caudal que o escalo alevim.

Para a boga as áreas com o mesmo valor de HSI, em função do caudal, através de percentagem, apresentam-se na Figura 4.16.

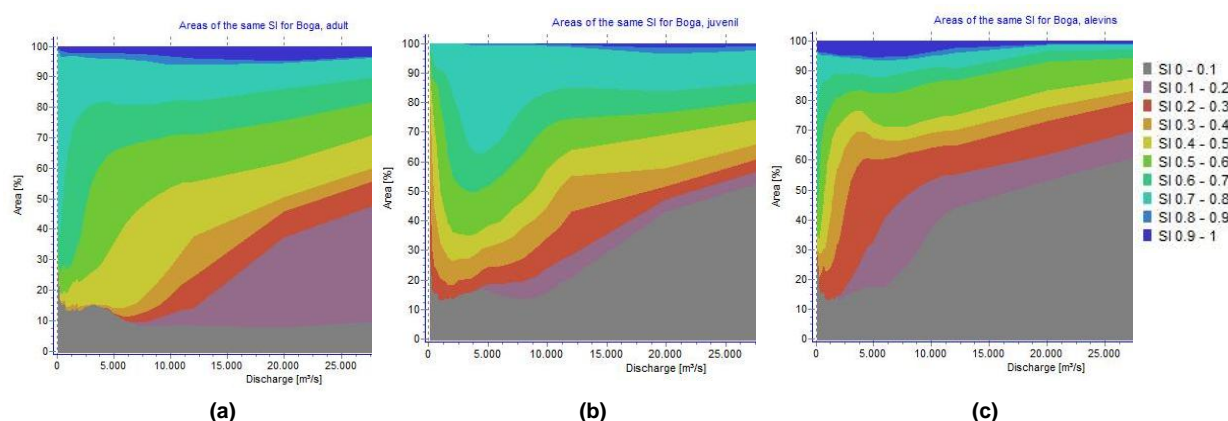
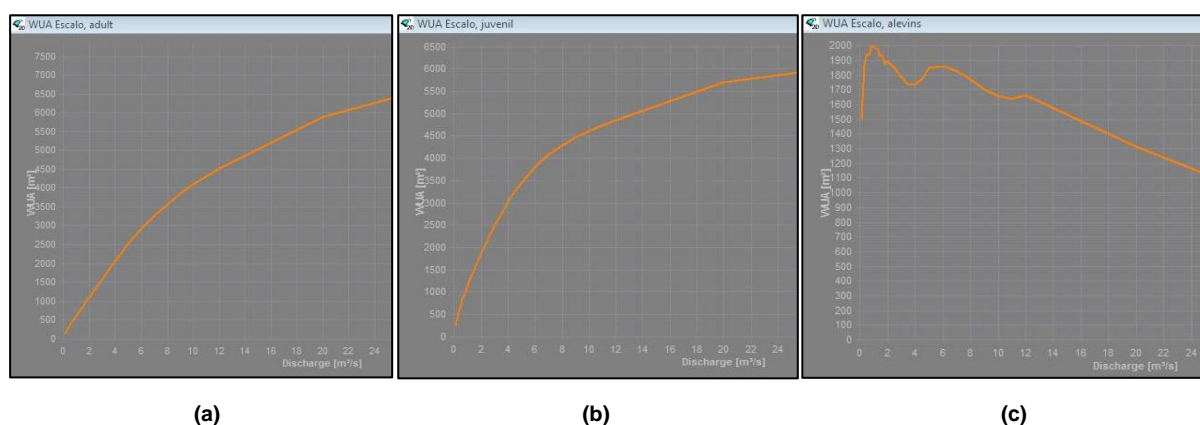


Figura 4.16. Áreas com o mesmo valor de HSI, em função do caudal, através de percentagem (%) para a boga, adulto (a), juvenil (b) e alevim (c).



A boga apresenta uma percentagem muito reduzida de áreas com valores de HSI elevados (0,9 -1). Para a boga juvenil e alevim as áreas com valores de HSI reduzidos são bastante mais reduzidas, sugerindo assim que esta espécie se encontra mais dependente das variações de caudal.

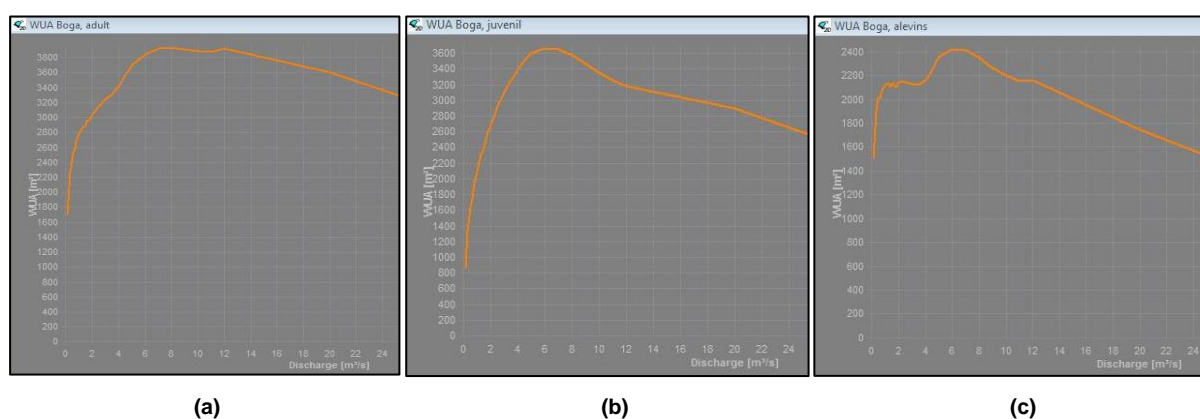
A análise das curvas de WUA em função do caudal foi efectuada separadamente para as duas espécies em estudo, boga e escalo. A Figura 4.17 apresenta os valores de WUA ( $m^2$ ) obtidos para o escalo, considerando as fases do seu ciclo de vida (adulto, juvenil e alevim).



**Figura 4.17.** Ribeira de Odelouca. Curvas WUA ( $m^2$ ) obtidas para o escalo, em função do caudal, para as fases do seu ciclo de vida, adulto (a), juvenil (b) e alevins (c).

A curva de WUA em função do caudal para o escalo adulto e juvenil, não apresenta um máximo para a gama de caudais estudados, não tendo sido simulados caudais de ordens de grandeza superiores por não serem susceptíveis de se encontrarem no troço em estudo.

A Figura 4.18 mostra os valores de WUA ( $m^2$ ) obtidos para a boga, em função do caudal, considerando as fases do seu ciclo de vida (adulto, juvenil e alevim).

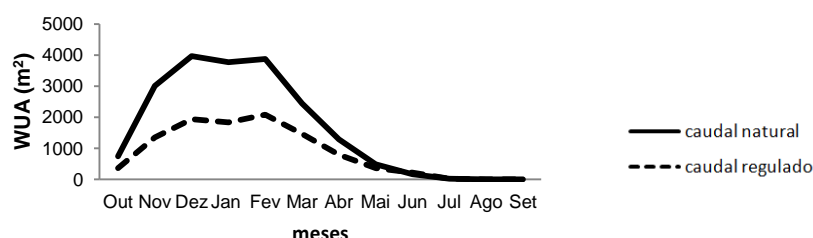


**Figura 4.18.** Ribeira de Odelouca. Curvas WUA ( $m^2$ ) obtidas para a boga, em função do caudal, para as fases do seu ciclo de vida, adulto (a), juvenil (b) e alevim (c).

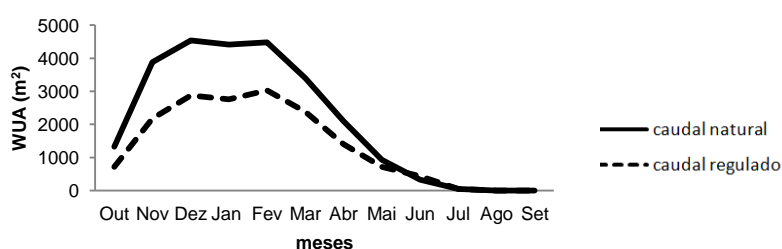
Para todas as alternativas em estudo, verifica-se uma subida dos valores de WUA no início, acompanhando o aumento de caudais, até atingir um máximo, a partir do qual o aumento de caudal leva à diminuição da adequabilidade de habitat. Os escalos adultos e juvenis apresentam uma excepção a este comportamento, não apresentando um valor máximo dentro da gama de caudais estudados. Em geral, verifica-se que existe uma gama maior de valores de WUA para o escalo, face à boga.

Os valores de WUA para o regime de caudais naturais e para o regime de caudais regulados foram comparados, em função dos meses do ano hidrológico, obtidos para o escalo e para a boga, considerando as três fases do seu ciclo de vida.

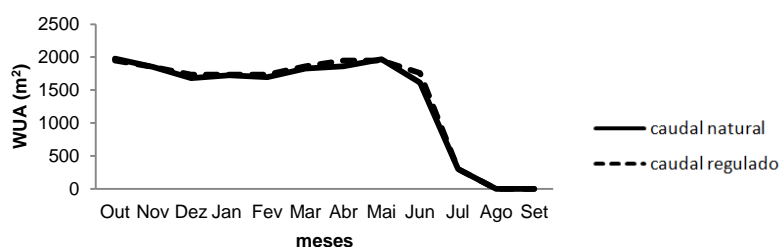
Nas Figuras 4.19, 4.20 e 4.21, apresentam-se as curvas WUA para o escalo, considerando os três estágios do ciclo de vida (adulto, juvenil e alevim) e os regimes de caudais naturais e regulados.



**Figura 4.19.** Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Curvas WUA (m<sup>2</sup>) obtidas em função dos meses do ano, para o caudal natural e para o caudal regulado. Escalo adulto.



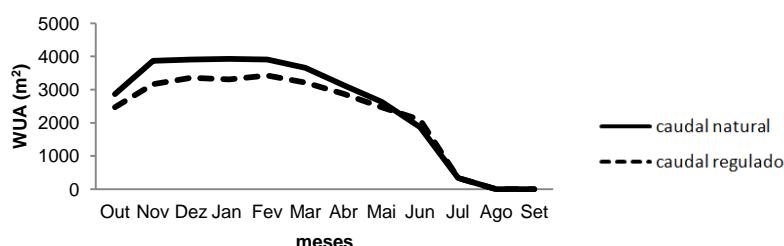
**Figura 4.20.** Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Curvas WUA (m<sup>2</sup>) obtidas em função dos meses do ano, para o caudal natural e para o caudal regulado. Escalo juvenil.



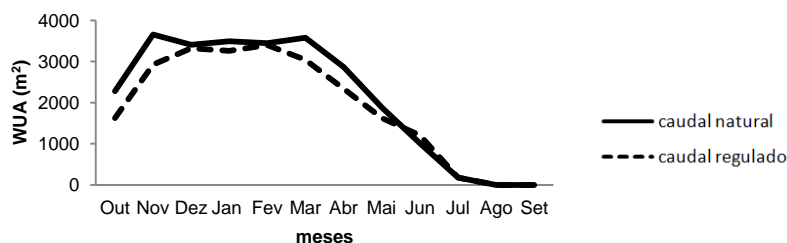
**Figura 4.21.** Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Curvas WUA ( $\text{m}^2$ ) obtidas em função dos meses do ano, para o caudal natural e para o caudal regulado. Escalo alevim.

A disponibilidade de habitat (WUA) para o escalo juvenil e adulto, diminuiu significativamente com a regulação de caudais, face aos caudais naturais, conforme se pode verificar nas Figuras 4.19 e 4.20. Ocorrendo uma menor discrepância de valores para o escalo alevim. Os valores médios obtidos, para os caudais naturais, foram  $1647,68 \text{ m}^2$ ,  $2120,38 \text{ m}^2$  e  $1374,89 \text{ m}^2$ , para adultos, juvenis e alevins, respectivamente. Para os caudais regulados, os valores médios de WUA obtidos foram  $866,9 \text{ m}^2$ ,  $1379,63 \text{ m}^2$  e  $1401,47 \text{ m}^2$ , para adultos, juvenis e alevins, respectivamente. Verifica-se um decréscimo significativo, cerca de  $750 \text{ m}^2$ , para o escalo adulto e juvenil, no entanto o escalo alevim não se mostra afectado pela regulação de caudais (Figura 4.21).

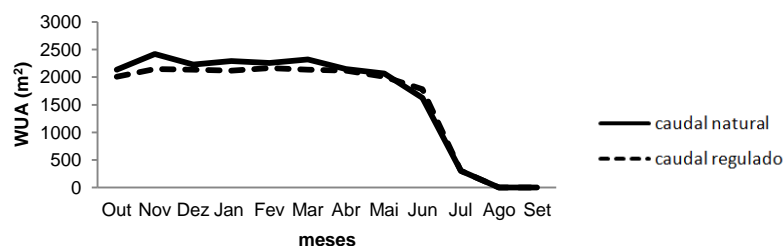
As curvas WUA para a boga, considerando os três estágios do ciclo de vida (adulto, juvenil e alevim) e os regimes de caudais naturais e regulados, apresentam-se nas Figuras 4.22, 4.23 e 4.24.



**Figura 4.22.** Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Curvas WUA ( $\text{m}^2$ ) obtidas em função dos meses do ano, para o caudal natural e para o caudal regulado. Boga adulto.



**Figura 4.23.** Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Curvas WUA ( $\text{m}^2$ ) obtidas em função dos meses do ano, para o caudal natural e para o caudal regulado. Boga juvenil.



**Figura 4.24.** Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Curvas WUA (m<sup>2</sup>) obtidas em função dos meses do ano, para o caudal natural e para o caudal regulado. Boga alevim.

Verifica-se nas Figuras 4.22, 4.23 e 4.24, que para a boga a disponibilidade de habitat, embora tenha diminuído com os caudais regulados, face aos caudais naturais, não apresenta uma diferença de valores tão significativa, como verificado com o escaló. Os valores médios de WUA obtidos para a boga, para os caudais naturais foram 2507,78 m<sup>2</sup>, 2149,25 m<sup>2</sup> e 1649,66 m<sup>2</sup>, para adultos, juvenis e alevins, respectivamente. Para os caudais regulados, os valores médios de WUA obtidos foram 2225,17 m<sup>2</sup>, 1909,48 m<sup>2</sup> e 1577,65 m<sup>2</sup>, para adultos, juvenis e alevins, respectivamente. Verifica-se um decréscimo de cerca de 250 m<sup>2</sup>, para a boga adulto e juvenil, com a regulação de caudais, sendo menos significativo este decréscimo, aproximadamente 72 m<sup>2</sup> para a boga alevim (Figura 4.24).

Os adultos boga e escaló são mais susceptíveis a variações de caudais do que os alevins. O escaló dispõe de maiores áreas de habitat do que a boga, sendo a boga mais susceptível a variações de caudais, pode afirmar-se que é uma espécie menos bem adaptada ao troço. O adulto é o estágio de vida mais afectado pelas variações de caudais.

## 6 Discussão

Um regime de caudais naturais oferece, geralmente, uma estrutura de habitat mais complexa, permitindo uma maior persistência das espécies piscícolas. Os ecossistemas aquáticos não perturbados apresentam uma matriz de habitat capaz de suportar as necessidades de todas as fases de vida das espécies (Boavida *et al.* 2011). Nos sistemas fluviais uma das principais mudanças na fauna de peixes, e que resulta directamente da presença física das barragens, é a alteração na riqueza e diversidade de espécies (Santos *et al.* 2004), consequência da diminuição de disponibilidade de habitat. O presente estudo verificou e validou este efeito através de utilização de uma nova metodologia, a lógica *fuzzy*, e utilizando um modelo muito recente CasimirFish2D.

A adequabilidade de habitat mostrou-se mais elevada antes do efeito de regulação de caudais, para ambas as espécies, verificando-se uma diferença de valores mais significativa para o escalo comparativamente à boga. A boga estando mais adaptada a locais de baixa velocidade e maior profundidade, será menos susceptível a esta alteração, contrariamente ao escalo que tem uma maior dependência pela velocidade (Santos e Ferreira 2008), dado que a regulação de caudais e a diminuição ou supressão de grandes áreas de *riffles* poderá ser mais penalizadora para esta espécie.

CasimirFish2D é um modelo de habitat que permite a utilização de lógica *fuzzy*. No entanto, necessita de cálculos hidráulicos anteriores, que neste caso foram realizados no River2D, levando a que a qualidade final da modelação de habitat esteja dependente dos dados, da calibração do modelo hidráulico e da eficácia deste.

A nova abordagem baseada no conhecimento de especialistas, não necessita do trabalho moroso e dispendioso de campo para a obtenção de curvas de preferência, permitindo que os conjuntos e regras *fuzzy* estejam associados à espécie, não sendo específico de cada rio. A lógica *fuzzy* sendo uma metodologia de compreensão relativamente simples, necessita de conhecimento prévio, especializado da espécie em estudo, que difere de pessoa para pessoa, e é dificilmente partilhado.

A adequabilidade de habitat varia com a ontogenia (Santos e Ferreira 2008), verificando-se no presente estudo que os adultos do escalo e da boga, são mais susceptíveis a variações de caudais do que os estágios mais precoces. As necessidades de habitat variam com o estágio de vida da espécie, sendo importante para um melhor entendimento destas necessidades, realizar estudos considerando esta metodologia, a fim de estabelecer recomendações adequadas de recuperação do habitat fluvial.

O modelo CasimirFish2D apresenta-se como uma boa alternativa a outros modelos de habitat, podendo ter uma boa aplicabilidade em estudos de restauro de habitats.

Futuros estudos devem incluir a comparação das duas metodologias para a modelação de habitat, curvas de preferência e lógica *fuzzy*, para um mesmo local de estudo, a fim de aferir a coerência de resultados.

## 7 Bibliografia

- Adriaenssens, V., Baets, B. D., Goethals, P. L. M., e Pauw, N. D. (2004). "Fuzzy rule-based models for decision support in ecosystem management." *The Science of the Total Environment* 319: 1-12.
- Adriaenssens, V., Goethals, P. L. M., e Pauw, N. D. (2006). "Fuzzy knowledge-based models for prediction of *Asellus* and *Gammarus* in watercourses in Flanders (Belgium)." *Ecological Modelling* 195: 3-10.
- Alves, M. H., e Bernardo, J. M. (2002). "Caudais Ecológicos em Portugal." INAG, DSP Lisboa.
- Bain, M. J., e Stevenson, N. J. (1999). "Aquatic Habitat Assessment: Common Methods." Bethesda Maryland, pp. 218.
- Boavida, I. (2007). "Análise Bidimensional na Determinação dos Caudais Ecológicos - Aplicação do Modelo River2D - Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Hidráulica e Recursos Hídricos." Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico.
- Boavida, I., Santos, J.M., Cortes, R.V., Pinheiro, A.N., e Ferreira, M.T. (2010). "Assessment of instream structures for habitat improvement for two critically endangered fish species." *Aquatic Ecology* 45:113–124.
- Boavida, I., Santos, J.M., Cortes, R.V., Pinheiro, A.N., e Ferreira, M.T. (2011). "Benchmarking river habitat improvement." *River Research and Applications* DOI: 10.1002/rra.1561.
- Boavida, I. Santos, J.M., Pinheiro, A.N., e Ferreira, M.T. (2011). "Fish habitat availability simulations using different morphological variables." *Limnetica* 30 (2): 393-404.
- Boavida, I. (2012). "Ecohydraulic modelling for river restoration in Mediterranean-type streams." Tese elaborada para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia do Ambiente. Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico.
- Bock, W., e Salski, A. (1998). "A fuzzy knowledge-based model of population dynamics of the yellow-necked mouse (*Apodemus flavicollis*) in a beech forest." *Ecological Modelling* 108: 155-161.
- Bovee, K. (1982). "A Guide to Stream Habitat Analysis Using the Instream Flow Incremental Methodology." USDI Fish and Wildlife Service, pp. 45. Washington.

- Bovee, K. (1997). "Data Collection Procedures for the Physical Habitat Simulation System." pp 146, Fort Collins.
- Bovee, K. D., Lamb, B. L., Bartholow, J. M., Stalnaker, C. B., Taylor, J., e Henriksen, J. (1998). "Stream Habitat Analysis Using the Instream Flow Incremental Methodology." pp.130, Fort Collins.
- Cabral, M. J., Almeida, J., Almeida, P. R., Dellinger, T., Almeida, N. F., Oliveira, M. E., Palmeirim, J. M., Queiroz, A. L., Rogado, L., e Santos-Reis, M. (2006). "Livro Vermelho dos Vertebrados de Portugal, 2ª edição." Instituto da Conservação da Natureza/Assírio Alvim, Lisboa.
- Černý, J., Copp, G. H., Kováč, V., Gozlan, R., e Vilizzi, L. (2003). "Initial impact of the Gabčíkovo hydroelectric scheme on the species richness and composition of 0+ fish assemblages in the Slovak flood plain, River Danube." *River Research and Applications* 19: 749-766.
- Chang, M. H., Lin, Y. S., e Chaung, L. C. (1999). "Effects of dams on fish assemblages of the Tachia River, Taiwan." *Acta Zoologica Taiwanica* 10: 77-90.
- Costa, R. M. S., Martínez-Capel, F., Muñoz-Mas, R., Alcaraz-Hernández, J. D., e Garófano-Gómez, V. (2012). "Habitat suitability modelling at mesohabitat scale and effects of dam operations on the endangered Júcar nase, *Parachondrostoma arrigonis* (River Gabriel, Spain). *River Research and Application* 28:740-752.
- Crowder, D. W., e Diplas, P. (2000). "Using two-dimensional hydrodynamic models at scales of ecological importance." *Journal of Hydrology* 230: 172-191.
- Gan, K., e McMahon, T. (1990). "Variability of results from the use of PHABSIM in estimating habitat area." *Regulated Rivers: Research & Management* 5: 233-239.
- García, A., Jorde, K., Habit, E., Caamaño, D., e Parra, O. (2011). "Downstream environmental effects of dam operations: Changes in habitat quality for native fish species." *River Research and Applications*. 27: 312-327.
- Gard, M. (2009). "Comparison of spawning habitat predictions of PHABSIM and River2D models." *International Journal of River Basin Management*. Vol. 7, No. 1, pp. 55-71.
- Gehrke, P. C., Gilligan, D. M., e Barwick, M. (2002). "Changes in fish communities of the Shoalhaven River 20 years after construction of Tallowa Dam, Australia." *River Research and Applications* 18: 265-286.



- Ghanem, A., Steffler, P., e Hicks, F. (1996). "Two dimensional hydraulic simulation of physical habitat conditions on flowing streams." *Regulated Rivers: Research and Management* 12: 185-200.
- Jalón, D. G., Sanchez P., e Camargo, J. A. (1994). "Downstream effects of a new hydropower impoundment on macrophyte, invertebrate and fish communities." *Regulated Rivers: Research & Management* 9: 253-261.
- Jalón, D. G. (2002). "Ecological Regimes of Instream Flows Based on Physical Habitat Simulations: The Spanish Experience." *Fourth International Ecohydraulics Symposium*, Cape Town, South Africa.
- Jorde, K. (1997). "Ökologisch begründete, dynamische Mindestwasserregelungen bei Ausleitungskraftwerken, Dissertation." Universität Stuttgart. Stuttgart, Germany.
- Jowett, I. G. (1997). "Instream Flow methods: a comparison of approaches." *Regulated Rivers: Research & Management*. 13: 115-127.
- Lacey, R. W., e Millar, J. R. G. (2004). "Reach Scale Hydraulic Assessment of Instream Salmonid Habitat Restoration." *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 40 (6): 1631-1644.
- Mascarenhas, M., e Coelho, H. (2011). "IFIM: Metodologia para a determinação do caudal ecológico." *Renováveis magazine. Dossier mini-hidricas* 52 e 53.
- Mesquita, N., Carvalho, G., Shaw, P., Crespo, E., e Coelho, M. M. (2001). "River basin-related genetic structuring in an endangered fish species, *Chondrostoma lusitanicum*, based on mtDNA sequencing and RFLP analysis." *Heredity* 86: 253-264.
- Mouton, A. M., Schneider, M., Depestele, J., Goethals, P. L. M., e Pauw, N. D. (2007). "Fish habitat modelling as a tool for river management." *Ecological Engineering* 29: 305-315.
- Mouton, A. M., Schneider, M., Peter, A., Holzer, G., Muller, R., Goethals, P. L. M., e Pauw, N. D. (2008). "Optimisation of a fuzzy physical habitat model for spawning European grayling (*Thymallus thymallus* L.) in the Aare river (Thun, Switzerland)." *Ecological Modelling* 215: 122-132.
- Mouton, A. M., Baets, B. D., Broekhoven, E. V., e Goethals, P. L. M. (2009). "Prevalence-adjusted optimization of fuzzy models for species distribution." *Ecological Modelling* 220: 1776-1786.

- Pires, A. M., Costa, L. M., Alves, M. J., e Coelho, M. M. (2004). "Fish assemblage structure across the Arade basin (southern Portugal)." *Cybum* 28(4): 357-365.
- Santos, J. M., Godinho, F. N., e Ferreira, M. T. (2004). "Microhabitat use by Iberian nase *Chondrostoma polylepis* and Iberian chub *Squalius carolitertii* in three small streams, north-west Portugal." *Ecology of Freshwater Fish* 13: 223-230.
- Santos, J. M., e Ferreira, M. T. (2008). "Microhabitat use by endangered Iberian cyprinids nase *Iberochondrostoma almakai* and chub *Squalius aradensis*." *Aquatic Sciences* 70: 272 -281.
- Santos, J. M. (2012). "Regras e Conjuntos Fuzzy das espécies Boga do Sudoeste (*Iberochondrostoma almakai*) e Escalo do Arade (*Squalius aradensis*) para a ribeira de Odelouca." Instituto Superior de Agronomia. Trabalho não publicado.
- Sanz, D. B., e Jalón, D. G. (2002). "Avances y aspectos no resueltos en la estimación de regímenes de caudales ecológicos." III Congresso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua, Sevilla.
- Schneider, M. (2001). "Habitat und Abflussmodellierung für Fließgewässer mit unscharfen Berechnungsansätzen, Dissertation." Institut für Wasserbau. Universität Stuttgart. Stuttgart, Germany.
- Schneider, M., Noack, M., Gebler, T., e Kopecki, I. (2010). "Handbook for the habitat simulation model. Casimir. Module Casimir-Fish. Base version." SJE – Schneider & Jorde Ecological Engineering GmbH. LWW – Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart.
- Schneider, M. (2011). "Handbook for the habitat simulation model. Casimir. Module Hydropower." SJE – Schneider & Jorde Ecological Engineering GmbH. LWW – Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart.
- Schneider, M., Kopecki, I., Eberstaller, J., Frangez, C., e Tuhtan, J. A. (2012). "Application of Casimir-Gis for the simulation of brown trout habitat during rapid flow changes." 9<sup>th</sup> ISE , Vienna.
- Stalnaker, C. B., Lamb, B. L., Henriksen, J., Bovee, K., e Bartholow, J. (1995). "The Instream Flow Incremental Methodology: A Primer for IFIM." Washington.
- Steffler, P., e Blackburn, J. (2002). "River2D, Two-dimensional depth averaged model of river hydrodynamics and fish habitat. Introduction to depth average modeling and user's manual." University of Alberta, Canada.

Zadeh, L. A. (1965). "Fuzzy Sets." Information and Control 8: 338-353.



## **Anexos**



**Quadro A4.1. Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Ficheiro .txt com os conjuntos *fuzzy* para o escalo e boga. Importação para CasimirFish com a extensão .SRFzs.**

#	#						
vel	5	Fließgeschwindigkeit	Fließgeschwindigkeit [m/s]				zugehörigkeit [-]
VL	Sehr Gering	231	105	69	NOT_USED		
L	Gering	233	200	67			
0.00	0.00	0.40					
0.00	1.00	0.00					
M	Mittel	150	230	70			
0.00	0.40	0.80					
0.00	1.00	0.00					
H	Gross	71	228	205			
0.40	0.80	100.00					
0.00	1.00	1.00					
VH	Sehr Gross	181	177	119	NOT_USED		
#	#						
dep	5	wassertiefe	wassertiefe [m]				zugehörigkeit [-]
VL	Sehr Gering	231	105	69	NOT_USED		
L	Gering	233	200	67			
0.00	0.00	0.40					
0.00	1.00	0.00					
M	Mittel	150	230	70			
0.00	0.40	0.80					
0.00	1.00	0.00					
H	Gross	71	228	205			
0.40	0.80	100.00					
0.00	1.00	1.00					
VH	Sehr Gross	181	177	119	NOT_USED		
#	#						
sub	5	Substrat	Substrat-Index [-]				zugehörigkeit [-]
VL	Sehr Gering	231	105	69	NOT_USED		
L	Gering	233	200	67			
0.00	1.00	4.00	6.00	8.00	12.00		
1.00	1.00	0.00	0.00	1.00	1.00		
M	Mittel	150	230	70			
2.00	4.00	6.00					
0.00	1.00	0.00					
H	Gross	71	228	205			
4.00	6.00	8.00					
0.00	1.00	0.00					
VH	Sehr Gross	181	177	119	NOT_USED		
#	#						
SI	5	HSI	HSI				zugehörigkeit [-]
VL	Sehr Gering	231	105	69	NOT_USED		
L	Gering	233	200	67			
0.00	0.25	0.50					
1.00	1.00	0.00					
M	Mittel	150	230	70			
0.25	0.50	0.75					
0.00	1.00	0.00					
H	Gross	71	228	205			
0.50	0.75	1.00					
0.00	1.00	1.00					
VH	Sehr Gross	181	177	119	NOT_USED		

**Quadro A4.2.** Ribeira de Odelouca. Troço em estudo. Ficheiro .txt com as regras fuzzy para a boga adulto. Importar para CasimirFish com a extensão .SRFzy.

#[Boga, adult]	ve]	dep	sub	SI
#				
L	L	L	M	M
L	L	M	H	H
L	L	H	M	M
L	M	L	L	H
L	M	M	M	M
L	M	H	M	M
L	H	L	L	M
L	H	M	M	M
L	H	H	H	L
M	L	L	L	H
M	L	M	H	H
M	L	H	M	M
M	M	L	L	H
M	M	M	M	M
M	M	H	M	M
M	H	L	L	M
M	H	M	M	M
M	H	H	H	M
H	L	L	L	M
H	L	M	M	L
H	L	H	H	L
H	M	L	M	M
H	M	M	M	M
H	M	H	H	M
H	H	L	L	L
H	H	M	M	M
H	H	H	H	L